

Solarenergie

Institut für Solarforschung

Univ.-Prof. Dr. Bernhard Hoffschmidt



Wissen für Morgen

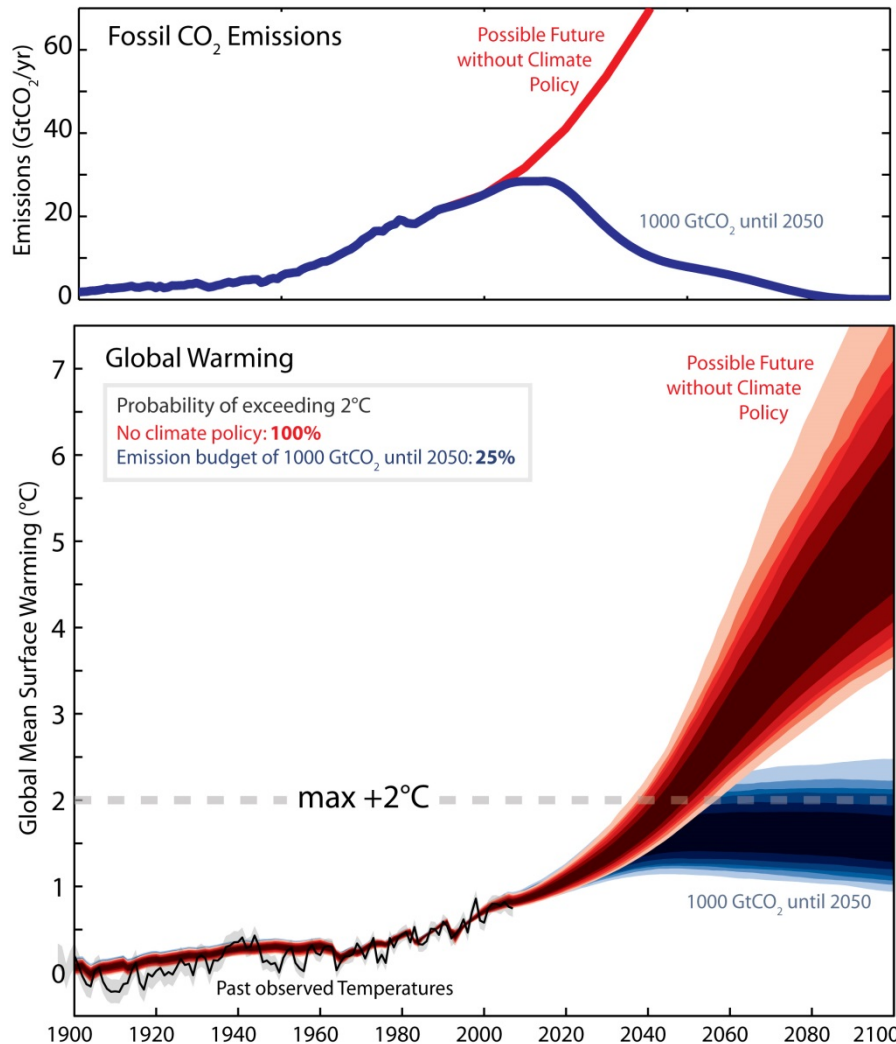


Inhalt

- Warum brauchen wir regenerative Energien?
- Was kann die Solarenergie beitragen?
- Welche Technologien stehen zur Verfügung?
 - Fotovoltaik (PV)
 - Konzentrierende Solarkraftwerke (CSP)
- Wie passen diese Technologien in einen zukünftigen Energiemix?



Warum brauchen wir regenerative Energien?

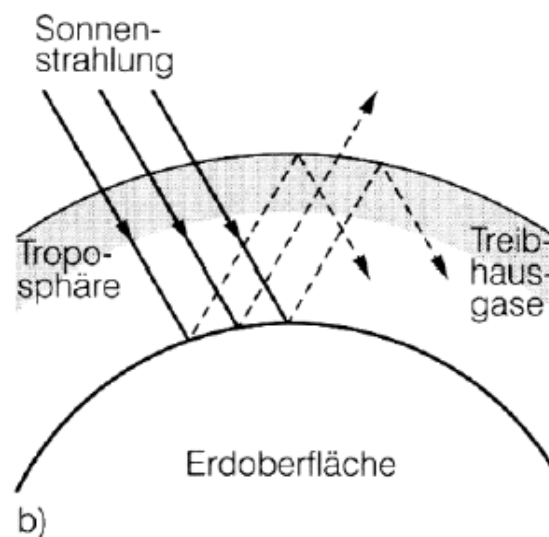
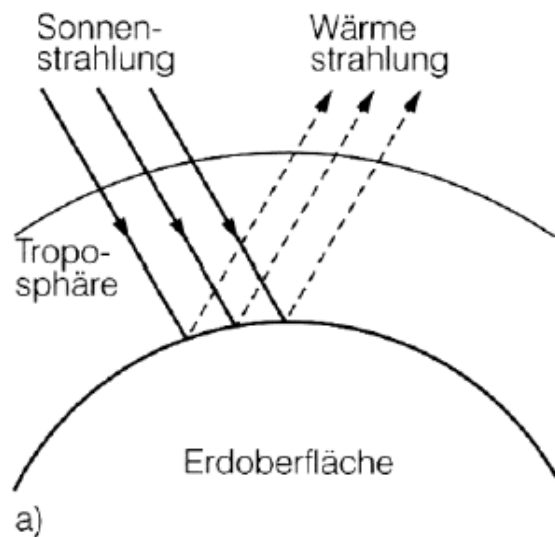


Source: M. Meinshausen et al. (2009)

Warum brauchen wir regenerative Energien?

Treibhauseffekt!!!

- ☛ Spurengase in der Atmosphäre verursachen einen natürlichen Treibhauseffekt: CO_2 , H_2O
- ☛ globale Durchschnittstemperatur bei 15°C , sonst: -18°C
- ☛ zusätzliche Treibhausgase mit hoher Absorption im langwelligen Bereich verstärken diesen Effekt: CO_2 , CH_4
- ☛ umweltbedingte Erwärmung heute $\sim 1,5\text{ K} - 2,5\text{ K}$



Quelle Blumberg & Spinner, 2003

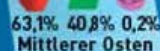
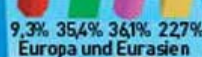
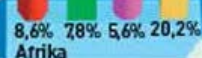


Warum brauchen wir regenerative Energien?

Energiereserven der Welt

Der Energiehunger der Menschheit wird heute zu über 85 Prozent durch die nicht erneuerbaren Energieträger Erdöl, Erdgas, Kohle und Uran gestillt. Diese gehen in absehbarer Zeit zur Neige.

1 Energievorräte nach Regionen



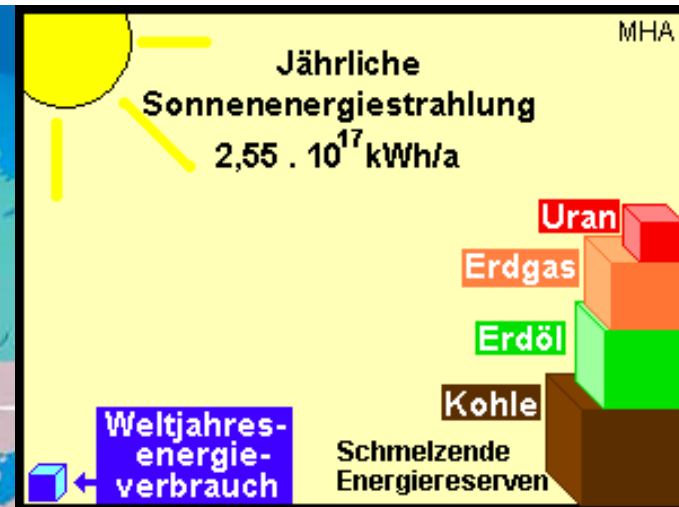
2 Statische Reichweite der Energieträger



3 Primärenergieverbrauchs nach Energieträgern

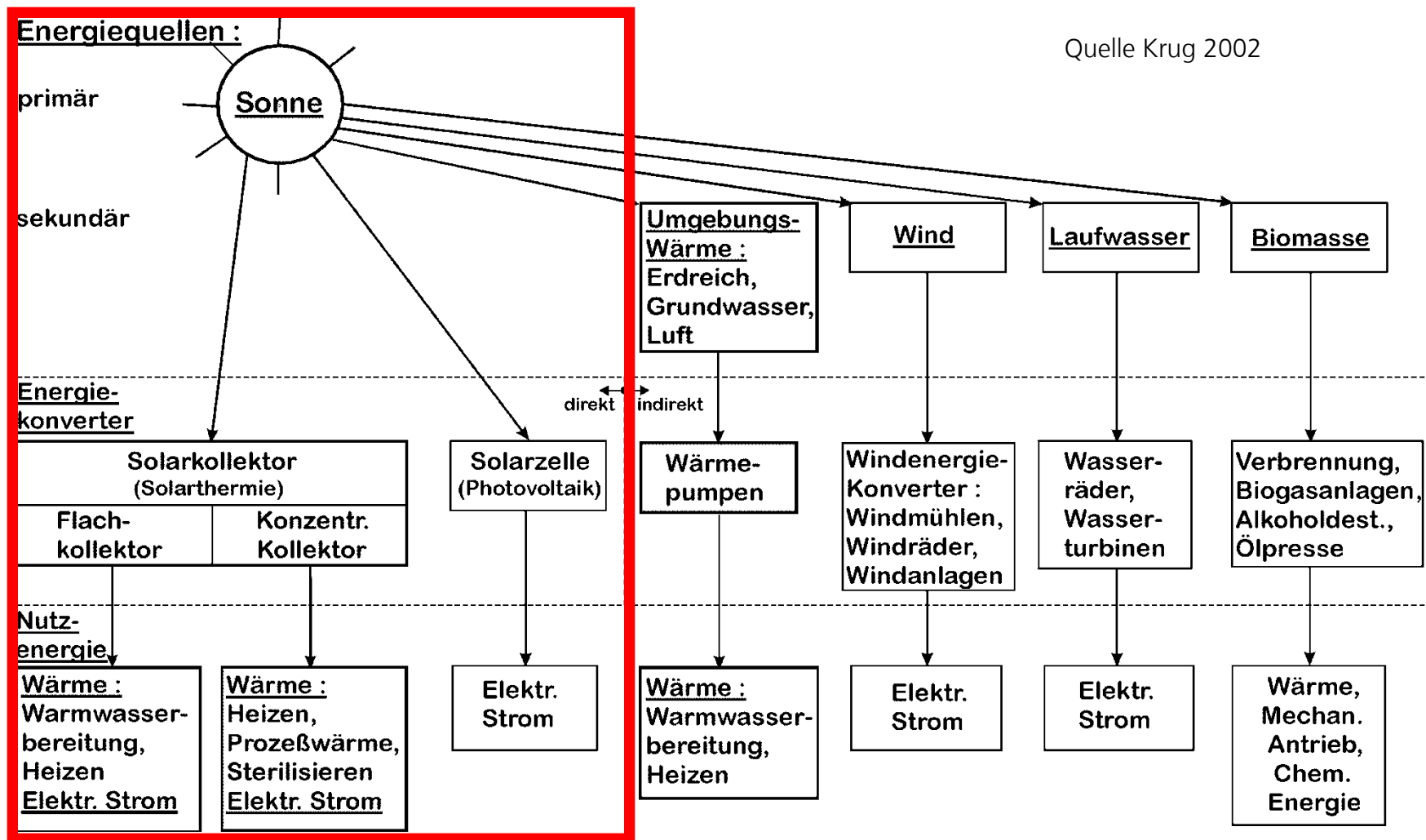


4 Stromproduktion nach Energieträgern

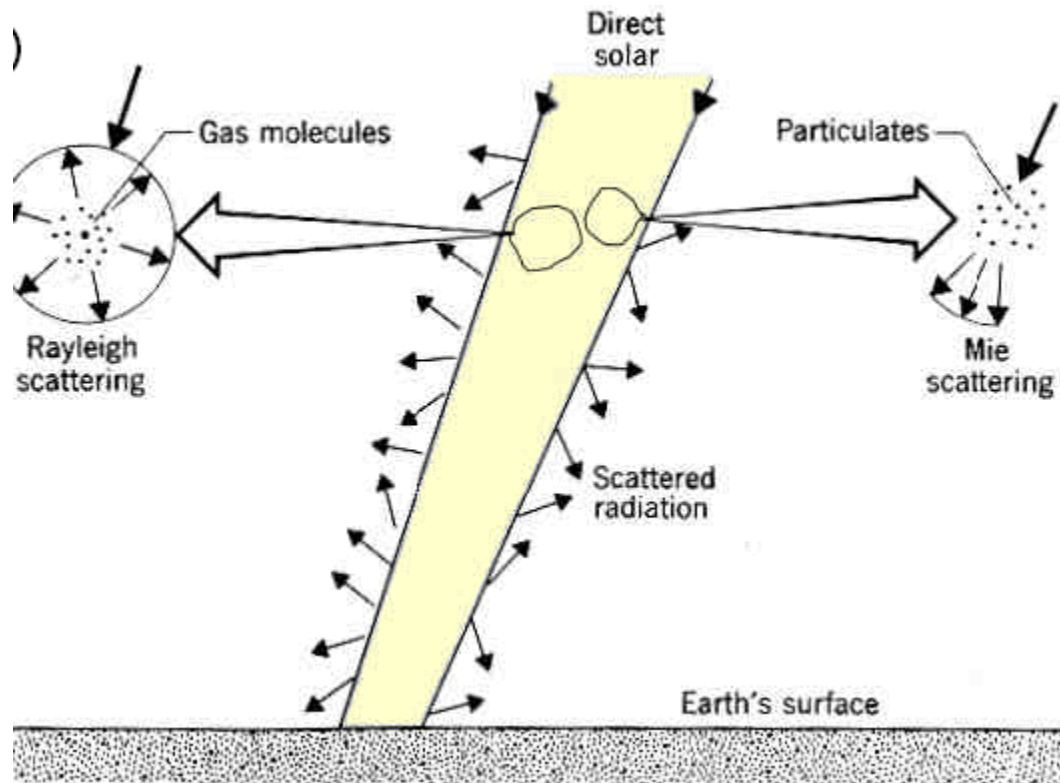


Was kann die Solarenergie beitragen?

Nutzungsmöglichkeiten der Sonne

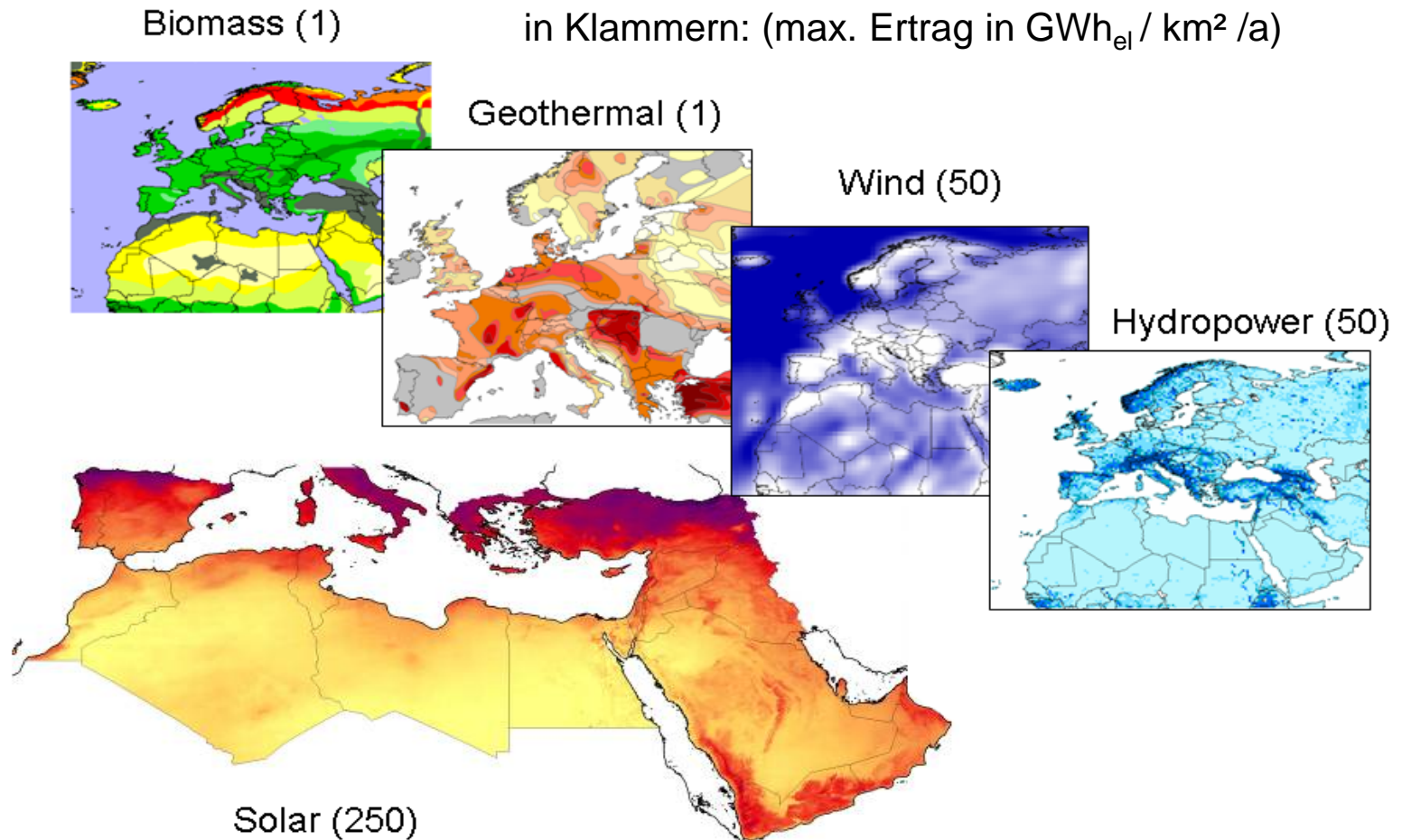


Streuung an Molekülen (Rayleigh, Mie)



Was kann die Solarenergie beitragen?

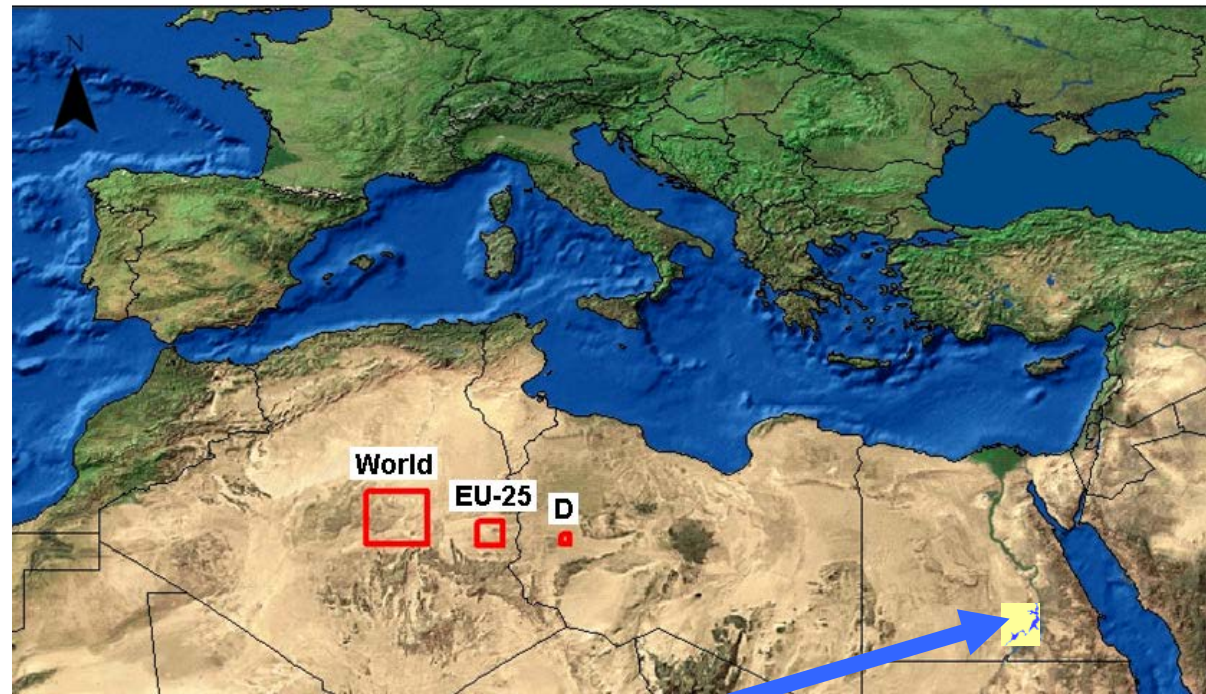
Regenerative Energieressource in Europa u. MENA



Was kann die Solarenergie beitragen?

Regenerative Energieressource in Europa u. MENA

- die regenerativen Energien übersteigen bei weitem den heutigen und zukünftigen Bedarf.
- 1 km² Wüste kann 50 MW Elektrizität erzeugen
- 1 km² Wüste erzeugt 200 - 300 GWh_{el} / Jahr
- 1 km² Wüste verhindert 200,000 t CO₂ / Jahr



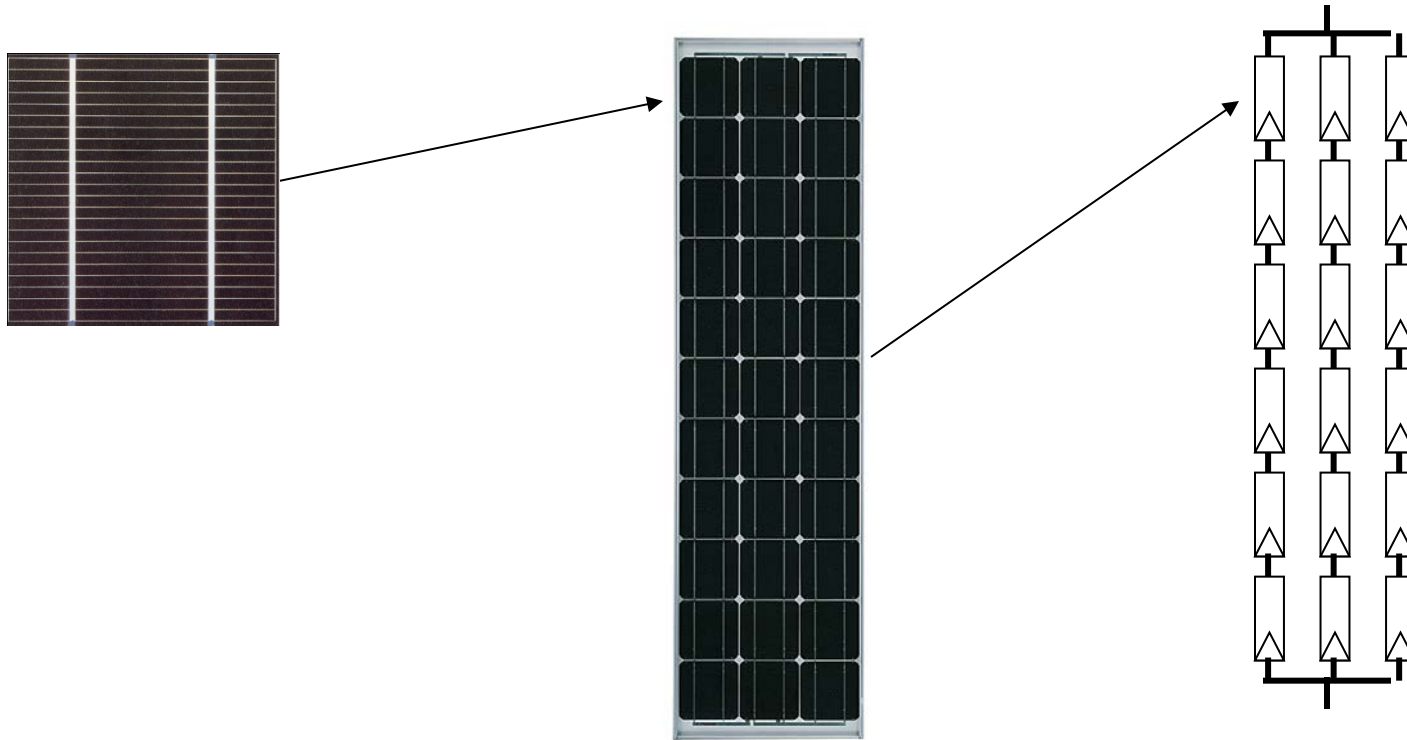
Die Elektrizitätsproduktion eines Solarkraftwerks mit der Größe der Fläche des Assuan-Stausees ist entspricht der Ölproduktion des gesamten Mittleren Osten

Welche Technologien stehen zur Verfügung?

Fotovoltaik



Solarzelle – Solarmodul – Solargenerator



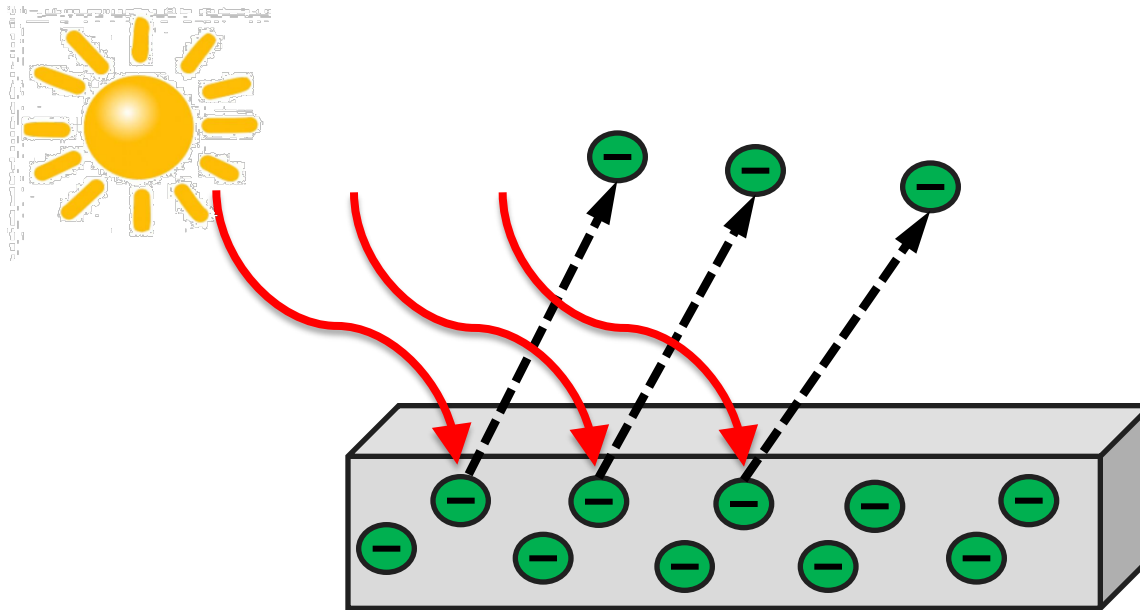
Photovoltaik = phōs (gr. Licht) + volt (Einheit el. Spannung)



Photoelektrischer Effekt

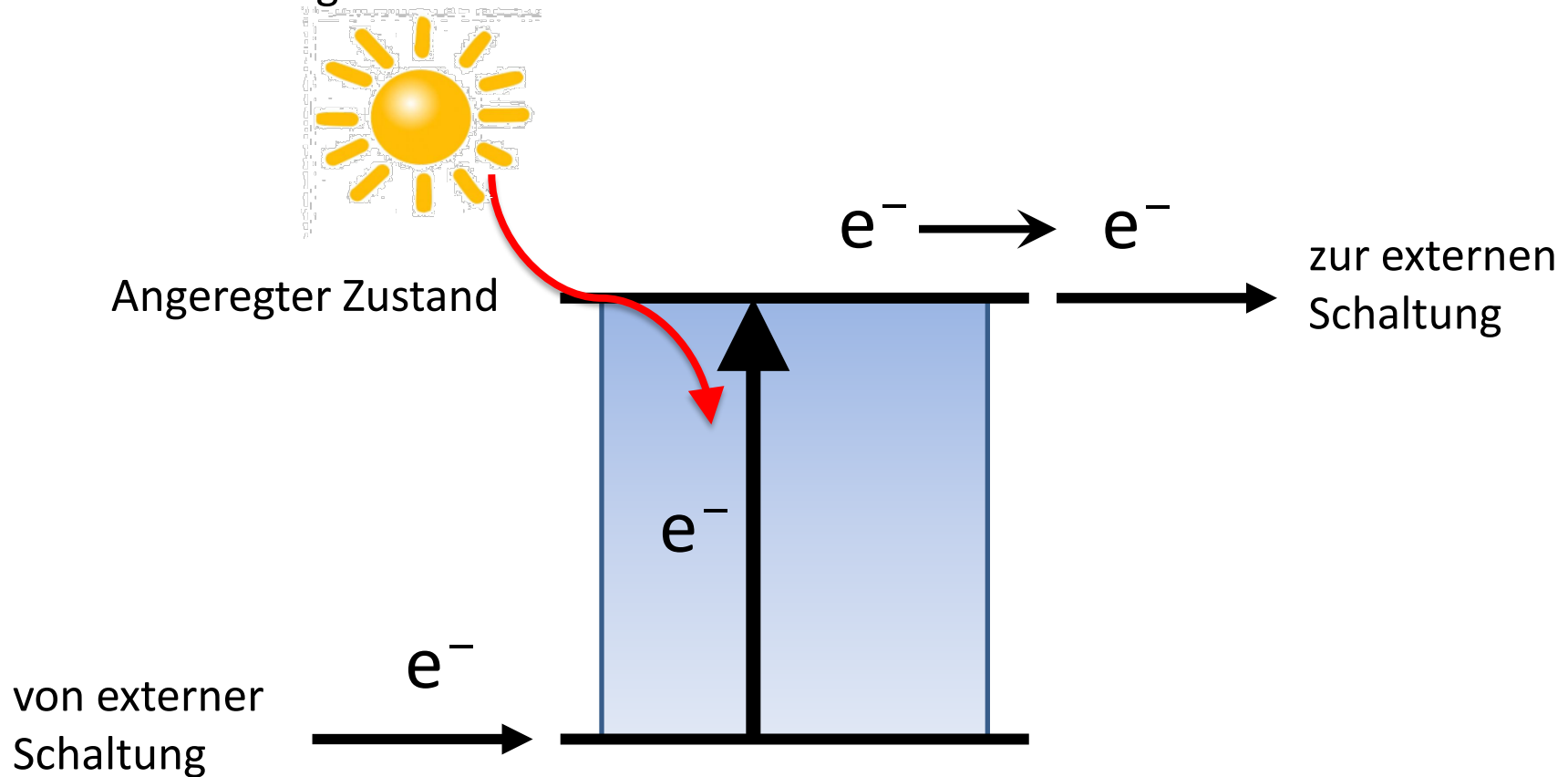
Photoelektrischer Effekt: Ablösung von Elektronen aus dem Atom oder Atomverband durch Einwirkung elektromagnetischer Strahlung.

Die Energieverteilung der abgelösten Elektronen ist nicht durch die Intensität des einfallenden Lichts bestimmt, sondern durch dessen Frequenz. Das Elektron besitzt die um die Ablösearbeit verminderte Energie des absorbierten Photons.



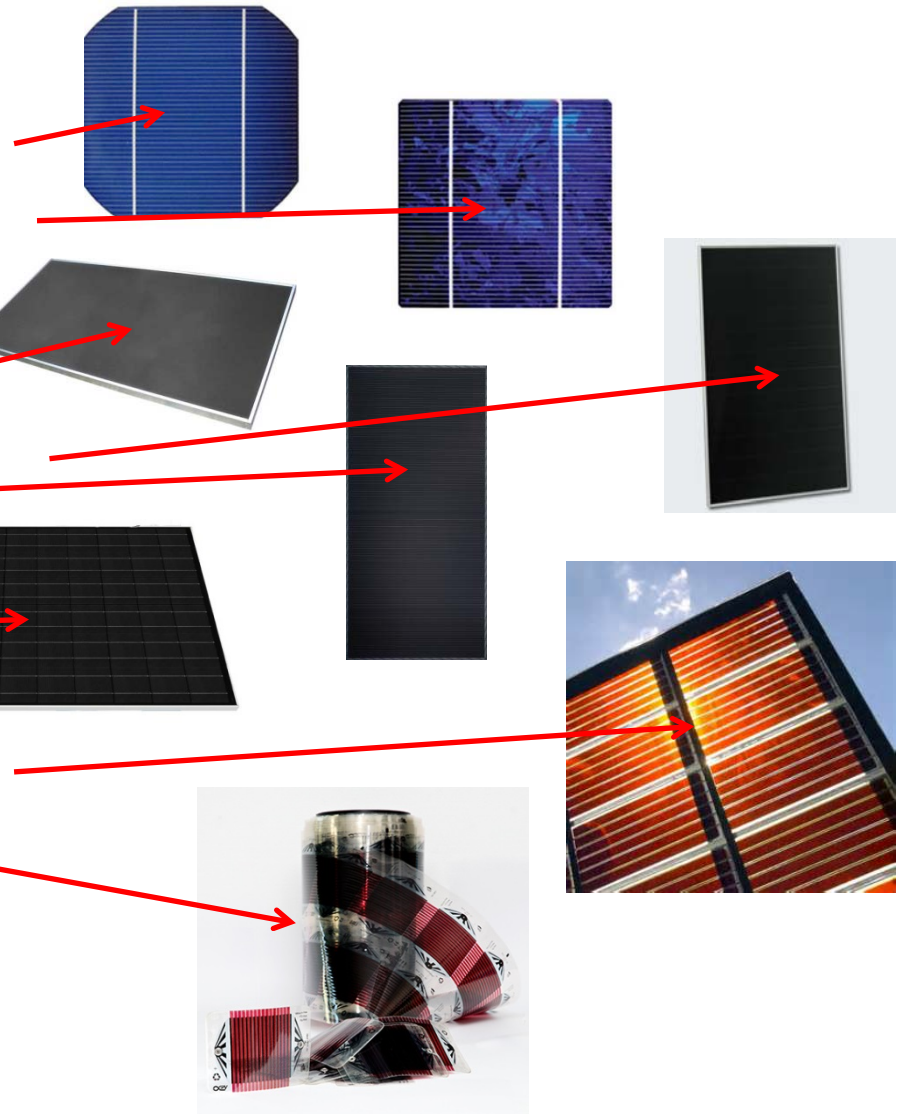
Photovoltaischer Effekt

Photovoltaischer Effekt: Effekt, bei dem unter Lichteinfall eine elektrische Potentialdifferenz zwischen zwei Elektroden erzeugt wird, also Licht direkt in elektrische Energie verwandelt wird.



Solarzellarten

- Dickschicht-Solarzellen
 - monokristallines Silizium (c-Si)
 - multikristallines Silizium (mc-Si)
- Dünnschicht-Solarzellen
 - amorphes Silizium (a-Si)
 - mikrokristallines Silizium (μ c-Si)
 - CdTe
 - GaAs
 - CIGS
- Farbstoff-Solarzellen (Grätzel-Zelle)
- Organische Solarzellen



Herstellung c-Si-Modul

Herstellung am Beispiel der kristallinen Siliziumzelle
(monokristallin/multikristallin)

1. Aus Quarzsand (SiO_2) + Kohle (C) wird in einem Lichtbogenofen Metallurgical Grade Silizium (MG-Si) hergestellt, welches eine Reinheit von ca. 98% hat.



+



→



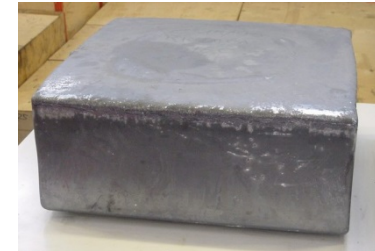
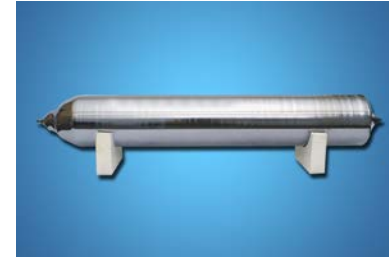
2. Das MG-Si wird dann in einem energieintensiven Prozess in Salzsäure (HCl) gelöst, destilliert und im Siemens-Reaktor wieder abgeschieden. Das Silizium hat so eine Reinheit von 99.999% und wird Solar Grade Silizium (SG-Si) genannt.



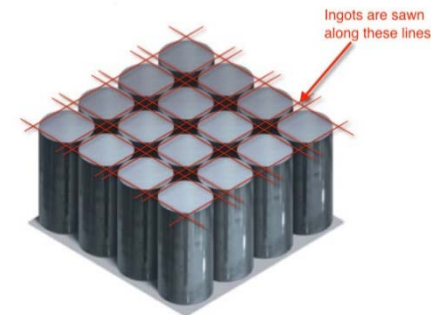
Herstellung c-Si-Modul

3. Dieses SG-Si wird dann zu monokristallinem oder multikristallinem Silizium weiter verarbeitet:

- a) mono: via Czochralski- oder Float-Zone-Verfahren erhält man monokristalline Siliziumstäbe
- b) multi: in einem Tiegel erstarrt das Silizium als Block an mehreren Kristallkeimen durch kolumnares Wachstum

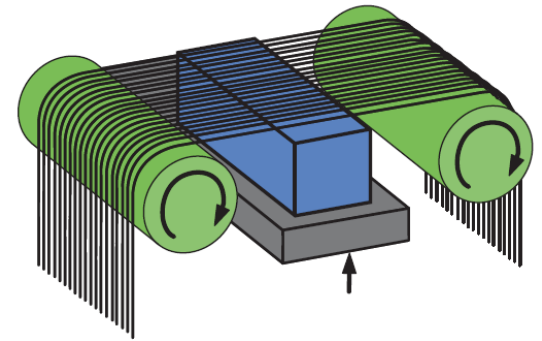


4. Der Siliziumrohling (Ingot) wird dann quadratisch (aus dem Stab oder Block) zugeschnitten.

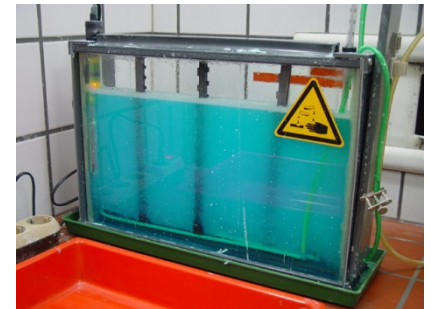


Herstellung c-Si-Modul

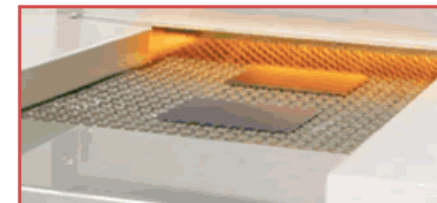
5. Dieser Siliziumquader wird dann in einer Drahtsäge zu dünnen Wafern zugeschnitten (ca. 180 μm).



6. Rückstände aus dem Sägevorgang werden weggeätzt. Allenfalls wird eine gewünschte Texturierung eingeätzt.



7. Dotierung durch Diffusion der entsprechenden Elemente. Z.B. Phosphor für p-Dotierung und Bor für n-Dotierung.

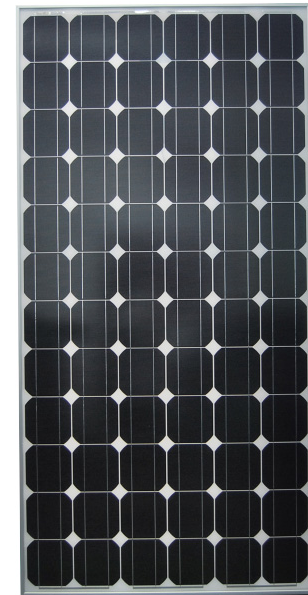
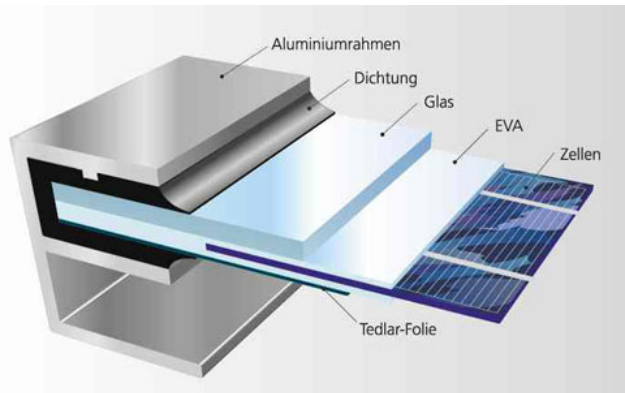


Herstellung c-Si-Modul

8. Mittels Siebdruck werden die elektronischen Kontakte aufgebracht.
Das Produkt ist dann die Solarzelle.

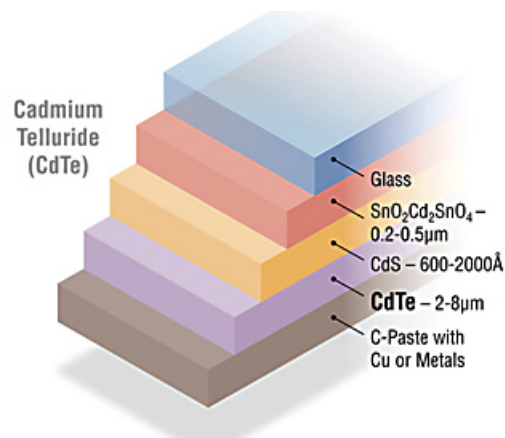


9. Aus mehreren Zellen wird schließlich durch verketteten, laminieren und einrahmen ein Solarmodul.



Herstellung CdTe-Modul

- Dünnschicht-Technologie
- Die benötigten Materialien werden schichtweise auf den Träger (meist Glas) aufgedampft (z. B. mit physical vapor deposition, chemical vapor deposition und plasma enhanced chemical vapor deposition) und die nötigen Strukturen werden mit Laser abgetragen.
- Tiefe Kosten pro Modul, da der Materialverbrauch viel geringer ist als bei Dickschichtzellen.
- Als Trägermaterial können auch flexible Materialien (z. B. Kunststoffe) verwendet werden.



Welche Technologien stehen zur Verfügung?

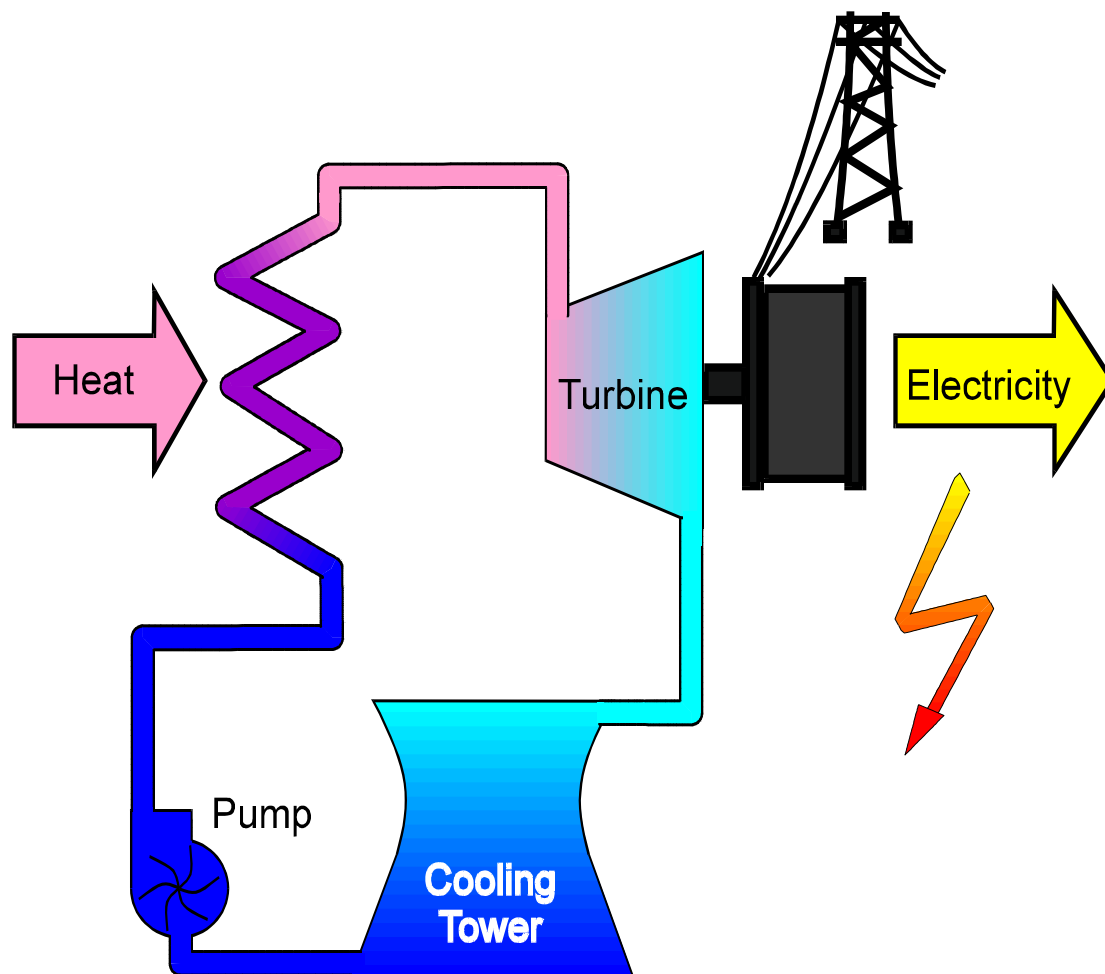
Konzentrierende Solarkraftwerke (CSP)



Wie funktioniert CSP?

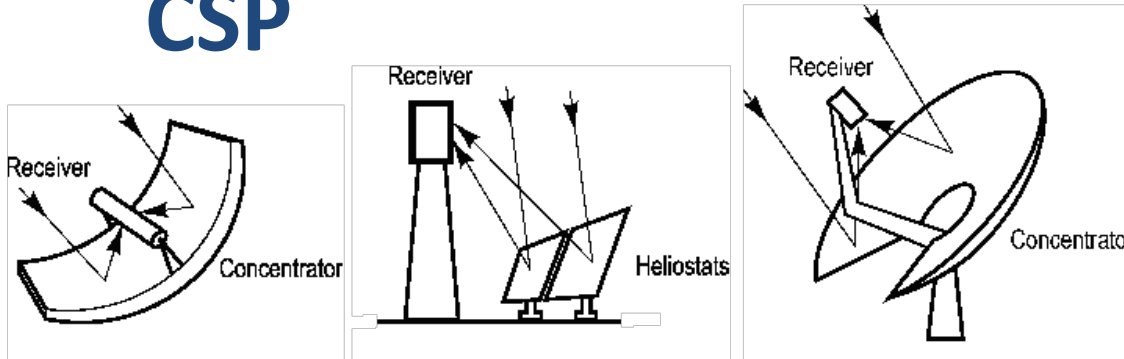


Solar thermal power plants



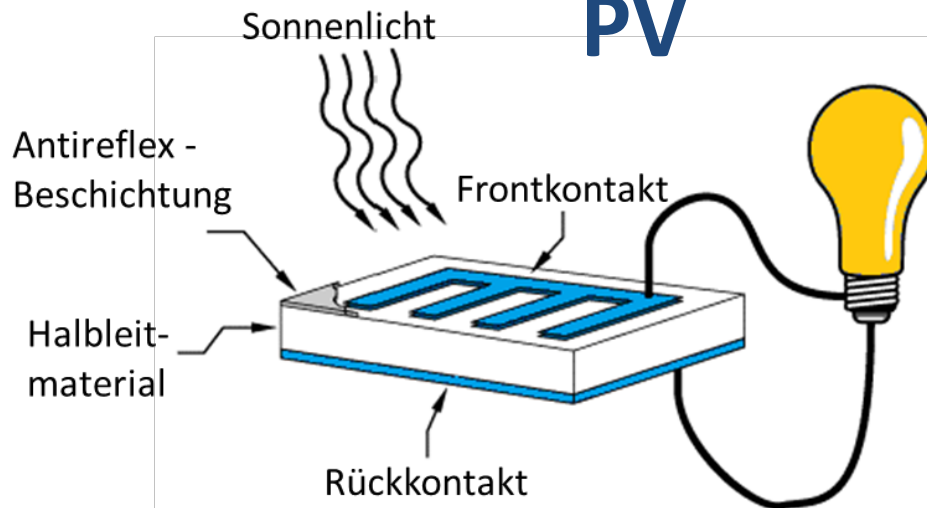
CSP gegenüber PV

CSP



Direktnormalstrahlung (DNI)
→ Klares Wetter ist erforderlich

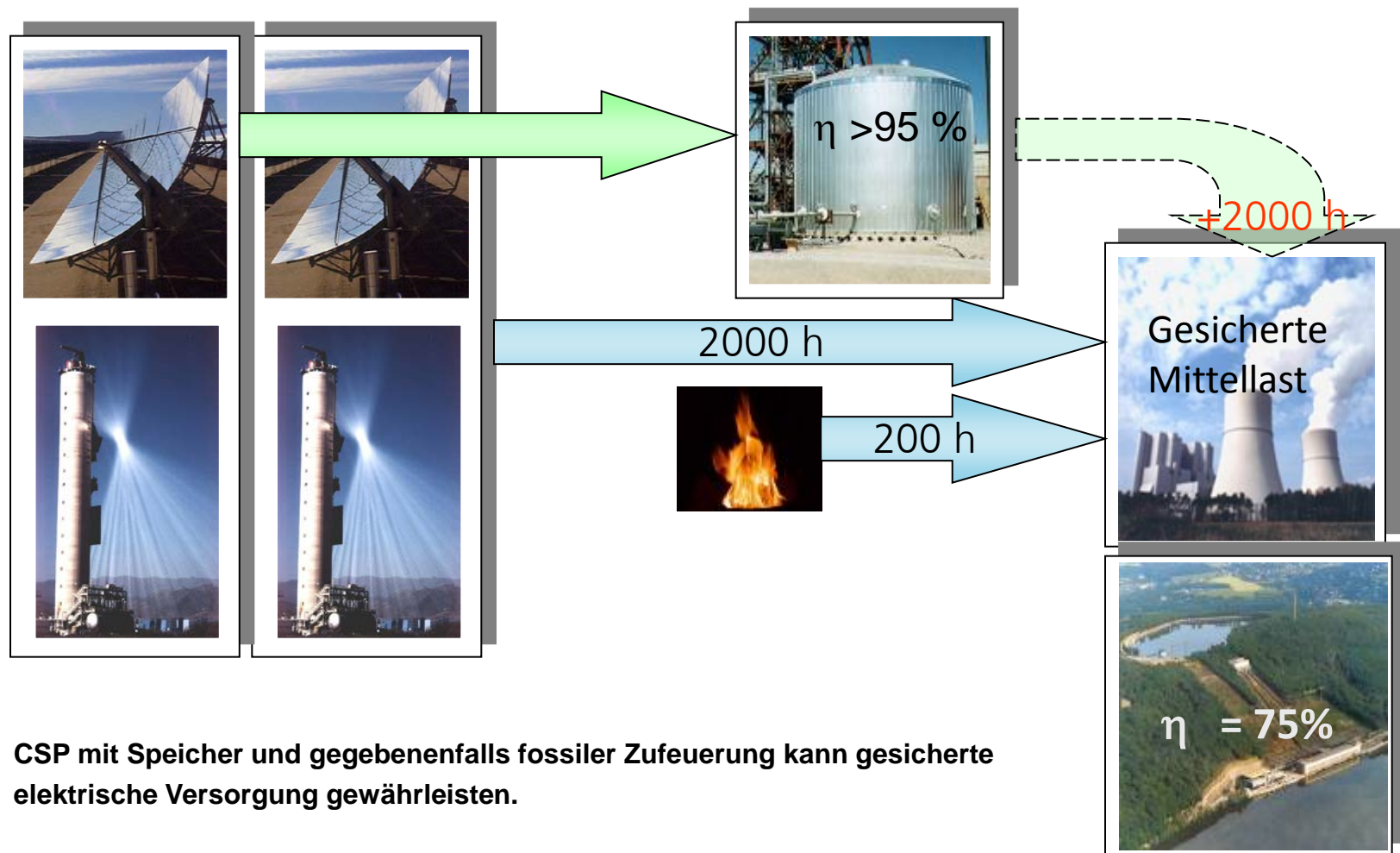
PV



DNI + diffuse Strahlung
→ PV-Zellen funktionieren auch bei (leicht) bewölktem Wetter



Thermischer Speicher gegenüber elektrischem Speicher Storage



CSP mit Speicher und gegebenenfalls fossiler Zufeuerung kann gesicherte elektrische Versorgung gewährleisten.

CSP Technologien

Parabolrinne



Linear Fresnel



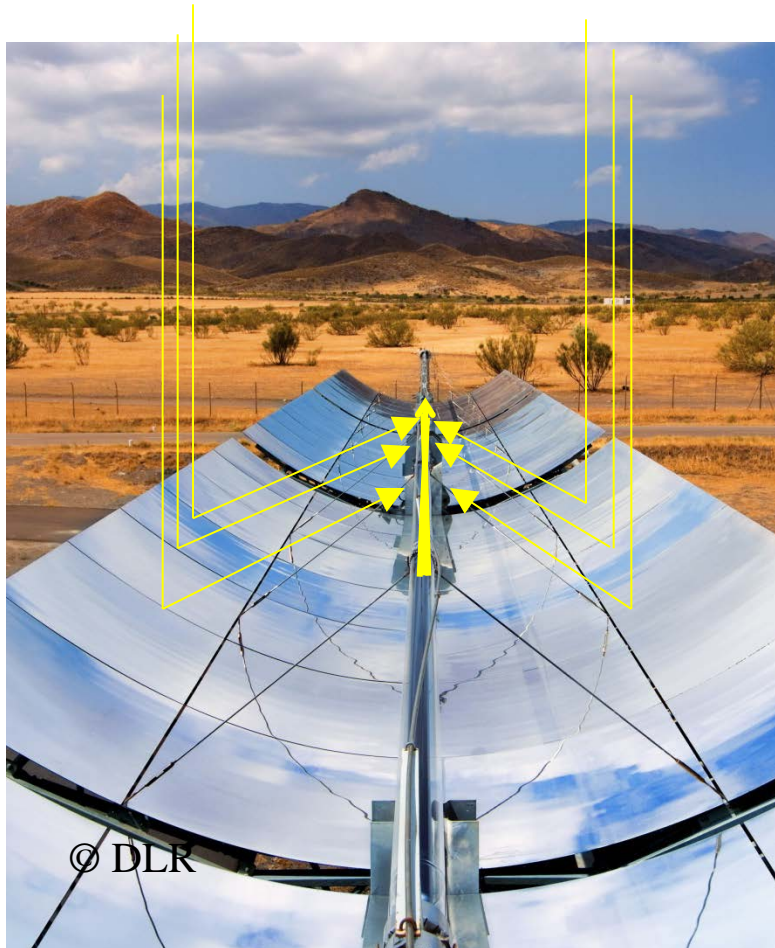
CSP Technologien



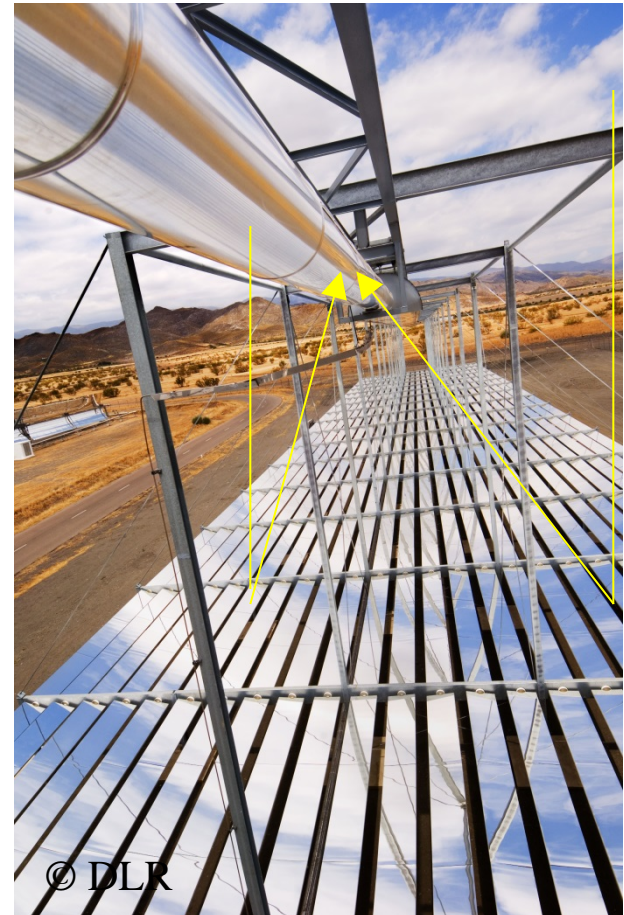
- **Prinzipielle Vorteile der Turmtechnologie**
- Kostenreduktion durch höhere Temperaturen und dadurch höhere Wirkungsgrade
- Effizientere Speicher durch größeren Temperaturhub
- Auch in hügeligen Gelände einsetzbar
- Potenzial zur direkten Erzeugung von solaren Brennstoffen

Technologie - Rinnensystem

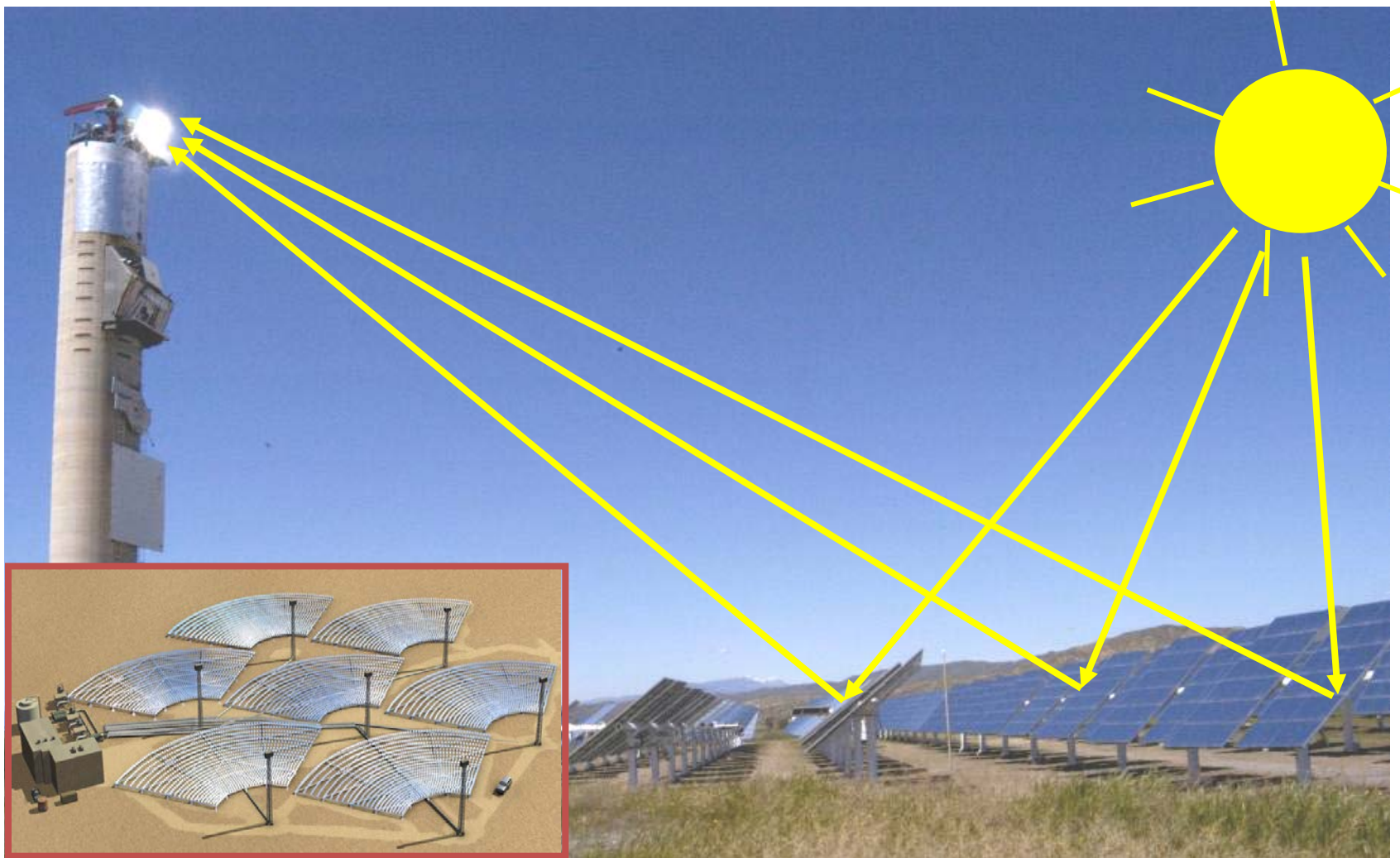
Parabolrinne



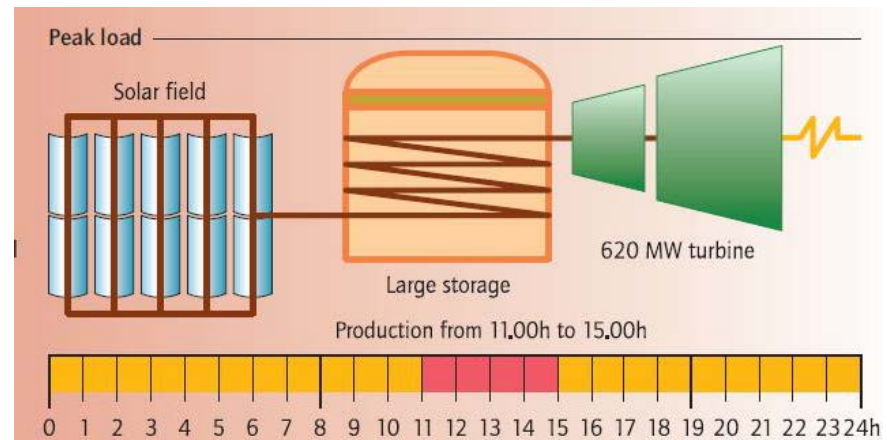
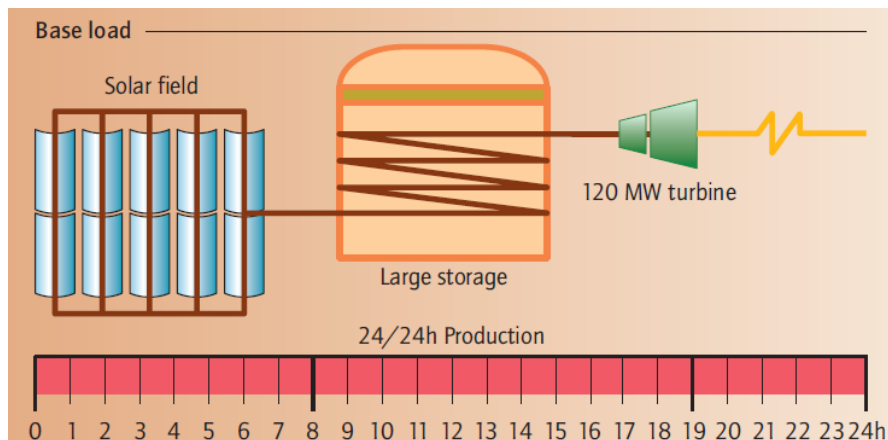
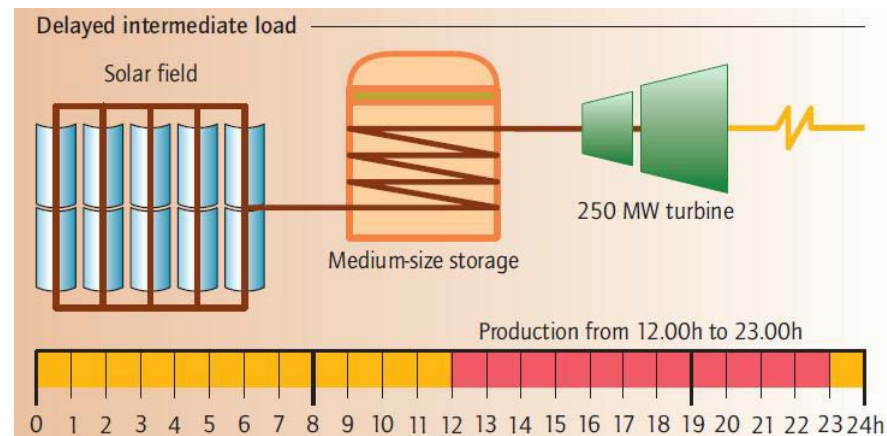
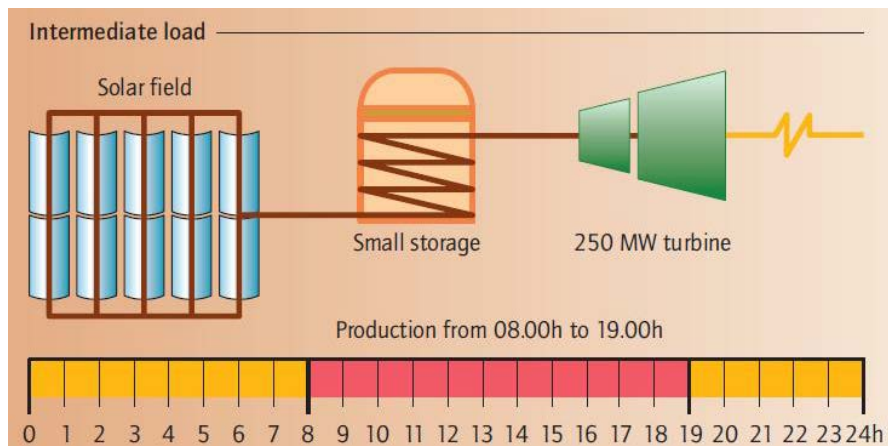
Linear Fresnel



Technologie - Turmsystem



Design Optionen für CSP mit thermischem Speicher



Source: IEA CSP Technology Roadmap 2010



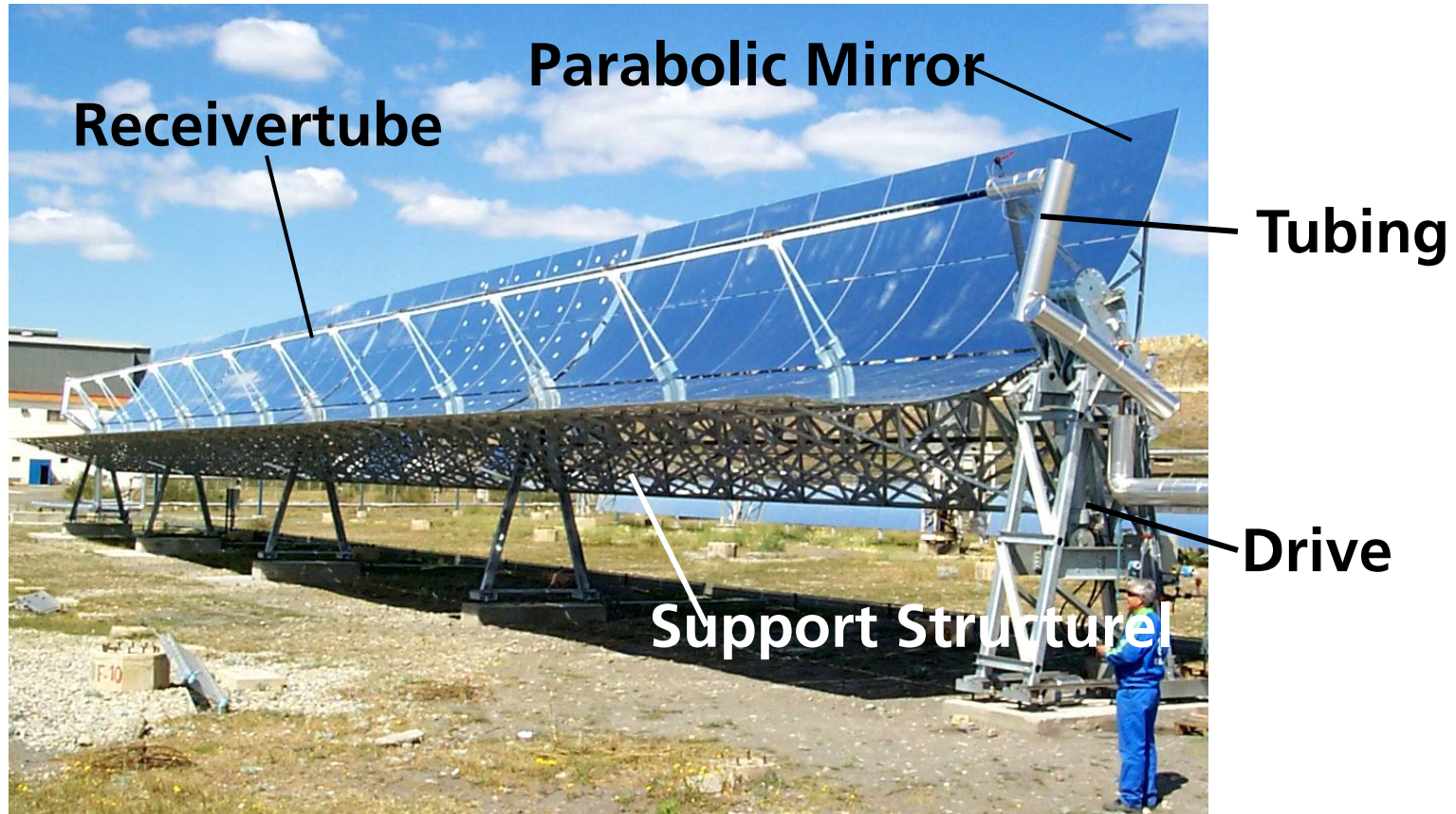
Markt



Source: **CSP Today Global Tracker** www.csptoday.com/tracker



Parabolrinnenkollektor

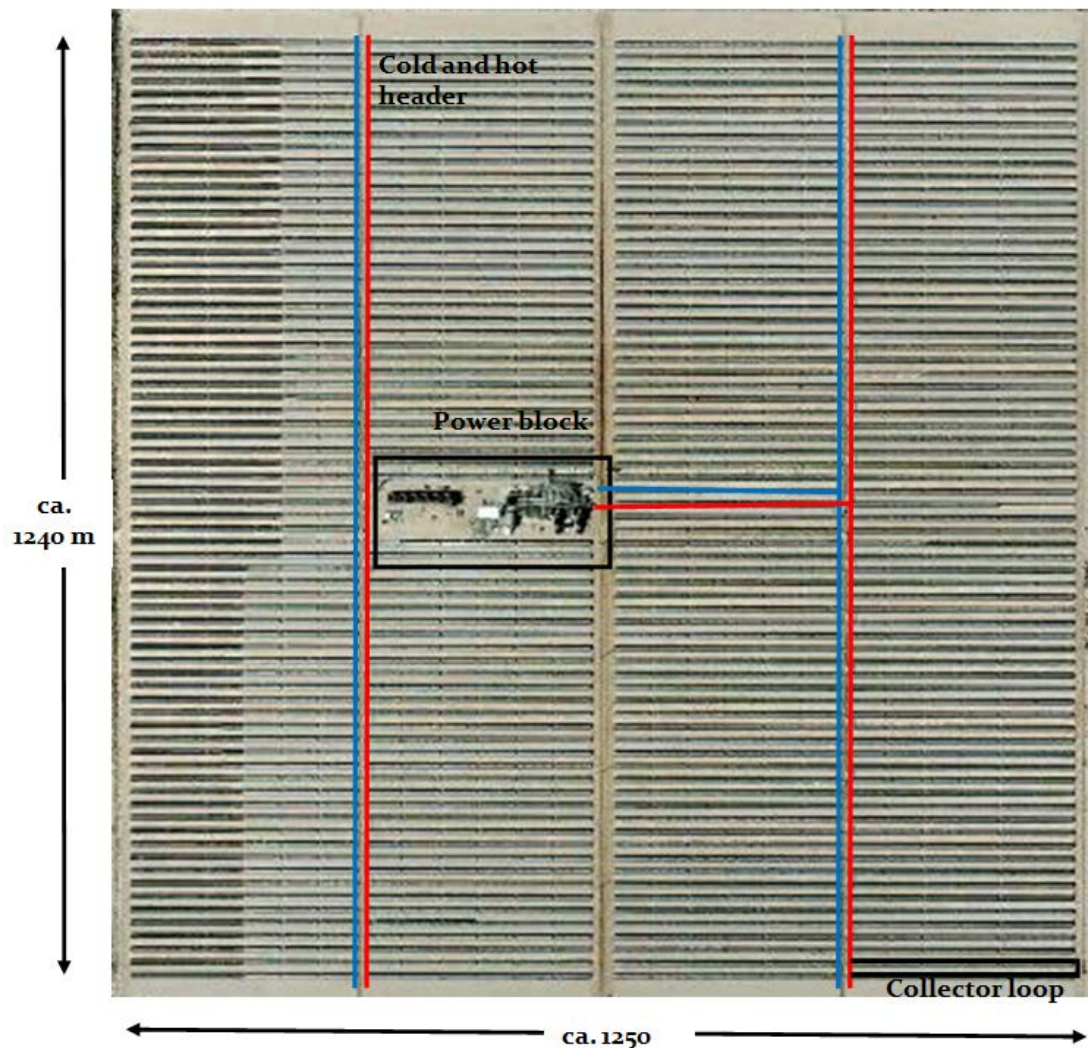


Eurotrough-Kollektor

Parabolrinnenkollektorfeld

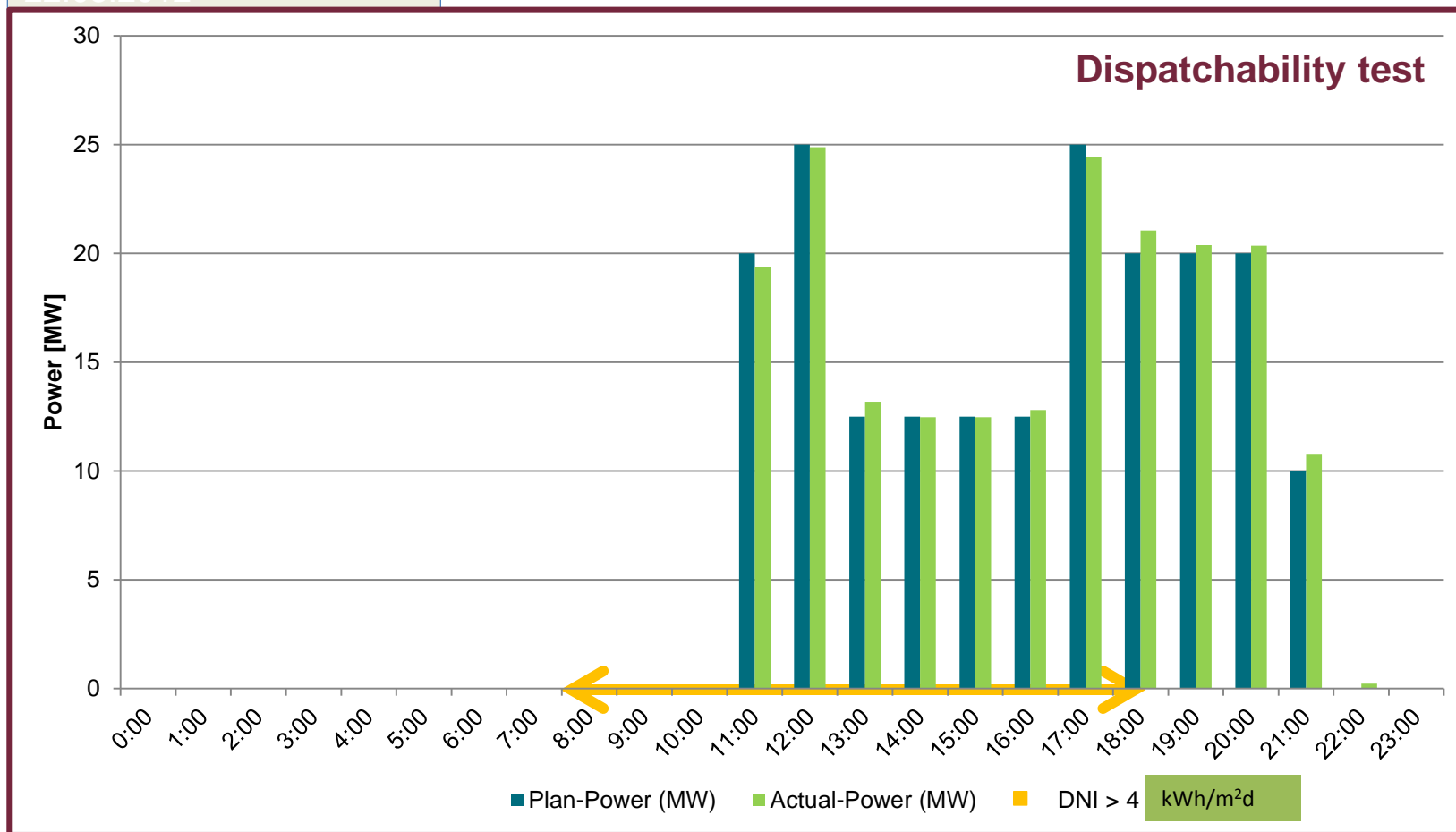
- rechteckig,
- power block im Zentrum

→ Kurze Rohrleitung
→ geringer thermische
Verluste



Kontinuierliche Stromproduktion

22.03.2012

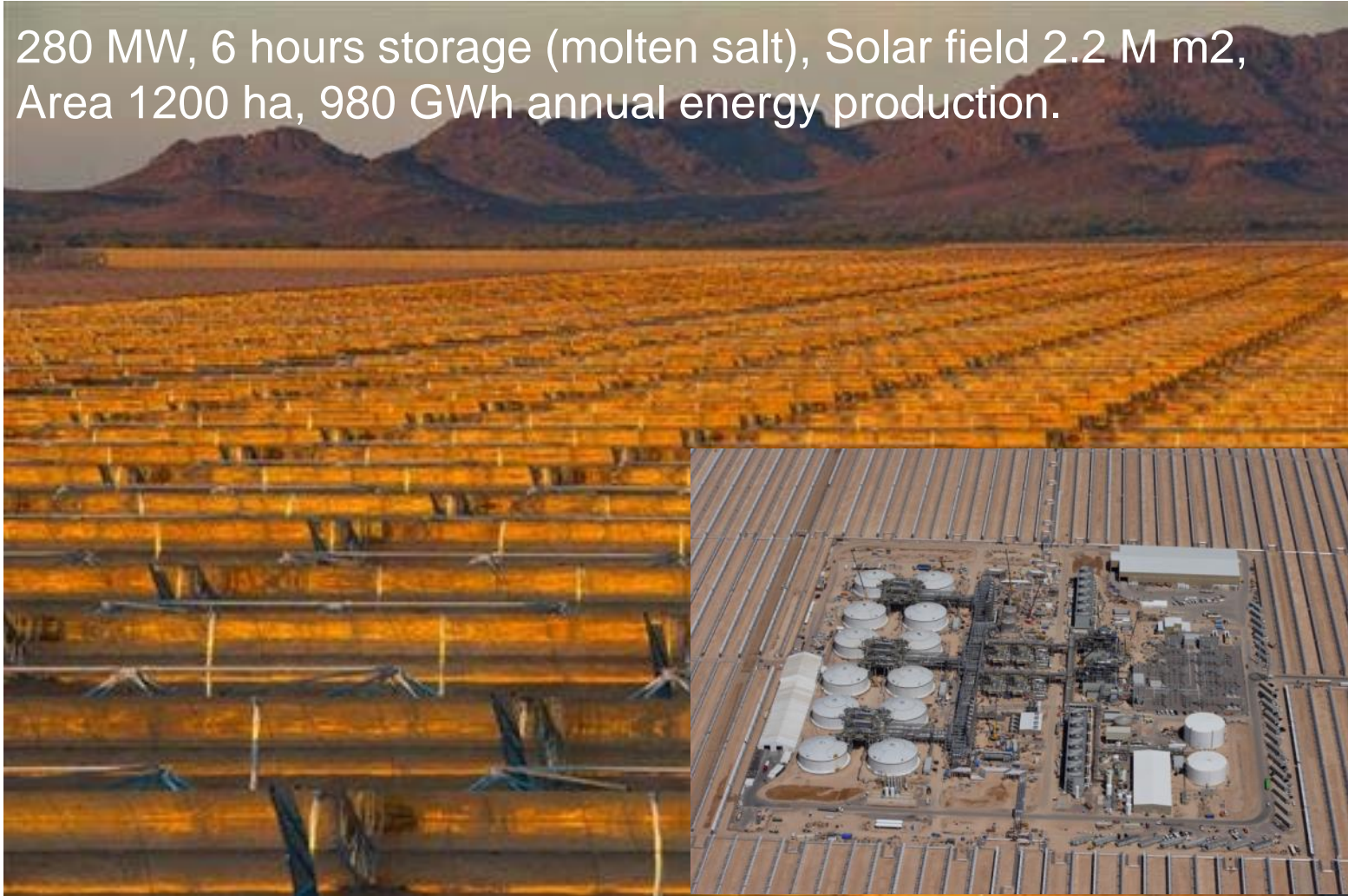


Source: RWE Innogy, F. Dinter

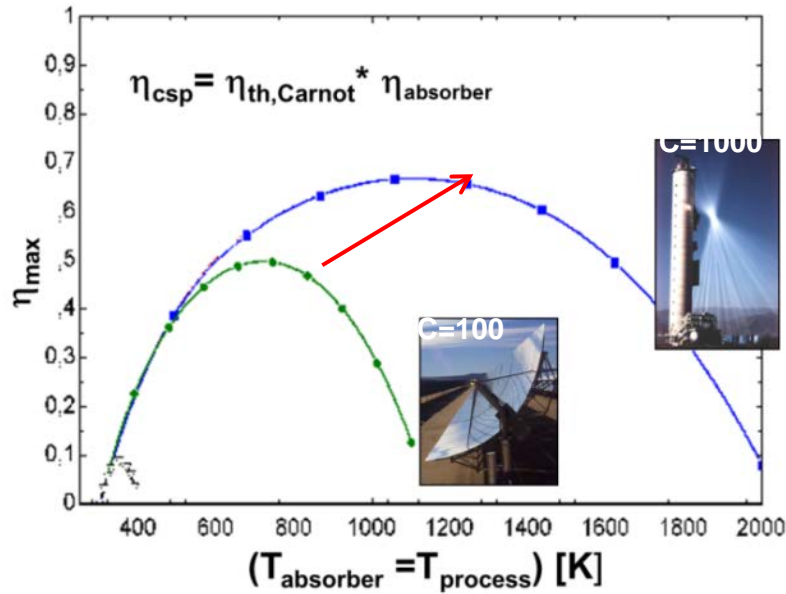


280 MW Solarkraftwerk in Nevada (seit 10. Okt. 2013)

280 MW, 6 hours storage (molten salt), Solar field 2.2 M m²,
Area 1200 ha, 980 GWh annual energy production.



Strategie zur Kostenreduktion

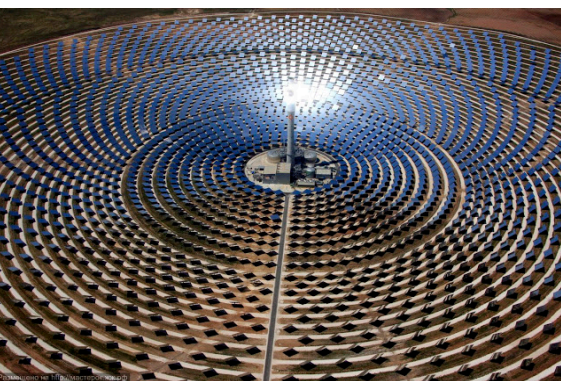


- Hohe Konzentration + hohe Temperaturen = hoher Wirkungsgrad = geringere Kosten
 - Neue Wärmeträgermedien für:
 - Höhere Betriebstemperaturen
 - Effiziente Speicherintegration
- Um das heutige Limit von **400°C** zu durchbrechen

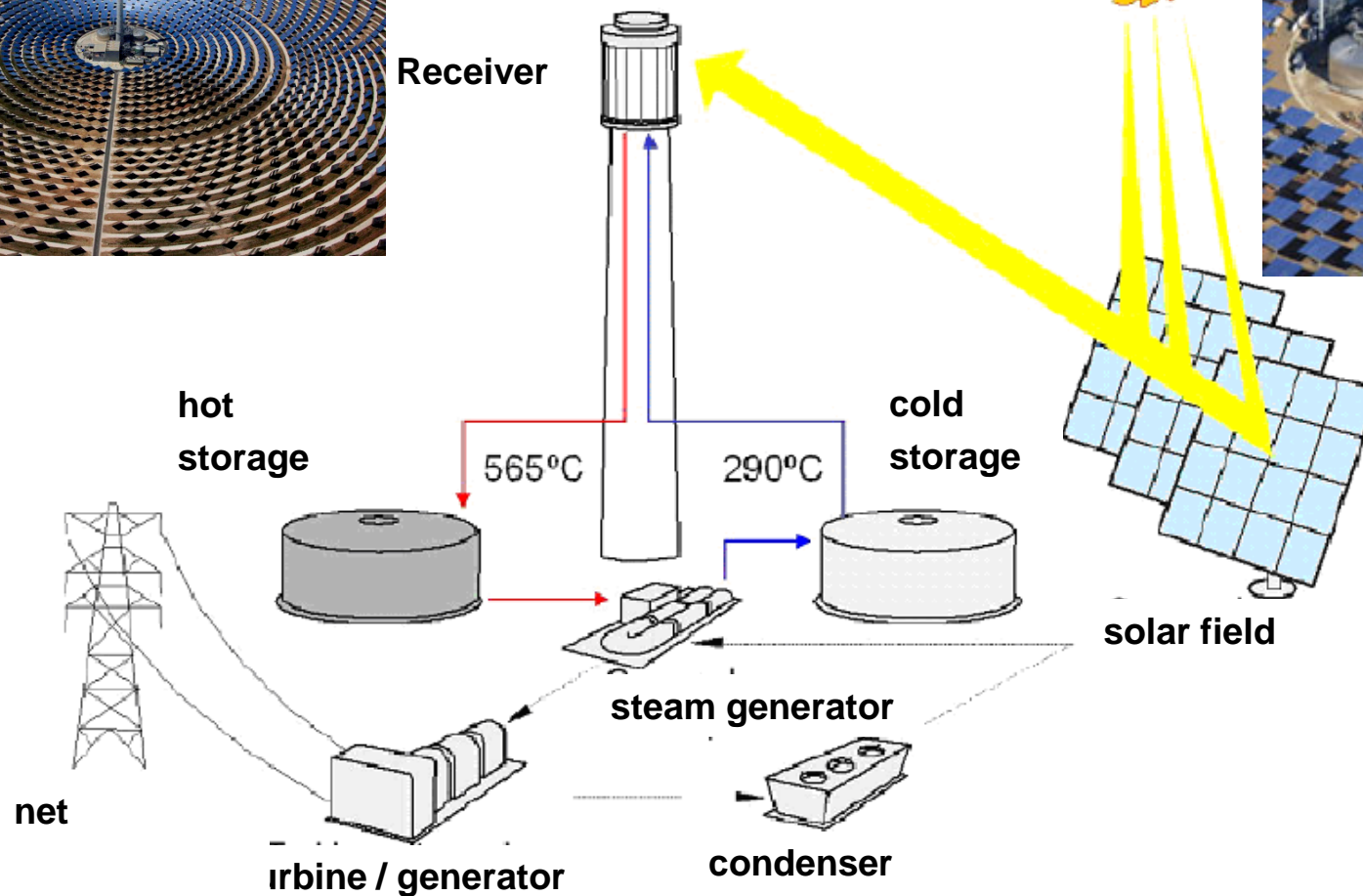
DLR Fokus:

- Turmtechnologie und Verwendung von Flüssigsalz bei Temperaturen von **$T > 500^{\circ}\text{C}$** mit **$\eta_{sys} > 16\%$** in **Parabolrinnenkraftwerken**

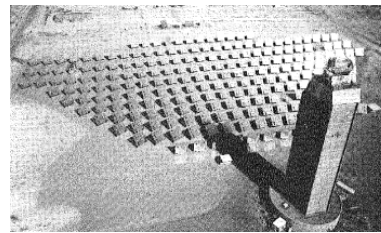
Turmtechnologie mit Flüssigsalz



Receiver



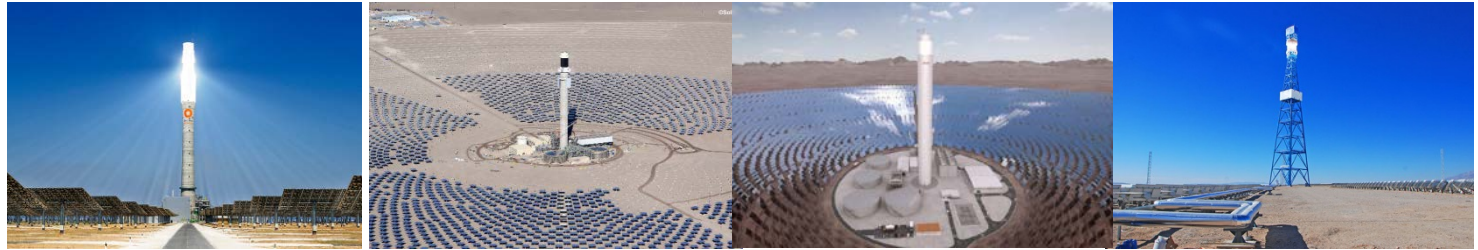
Turmtechnologie mit Flüssigsalz – Demonstration-Kraftwerke



	MSEE (1985)	Thémis (1983-1986)	Solar Two (1996-1999)
Site	Albuquerque (New Mexico)	Targassonne (Frankreich)	Daggett (California)
Design	Martin Marietta	CNIM	Rocketdyne
HTF	Solar Salt	Hitec	Solar Salt
Receiver type	Cavity	Cavity	External
Thermal power	5 MW _{th}	9 MW _{th}	42.2 MW _{th}
Electrical power	0.75 MW _{el}	2 MW _{el}	10 MW _{el}



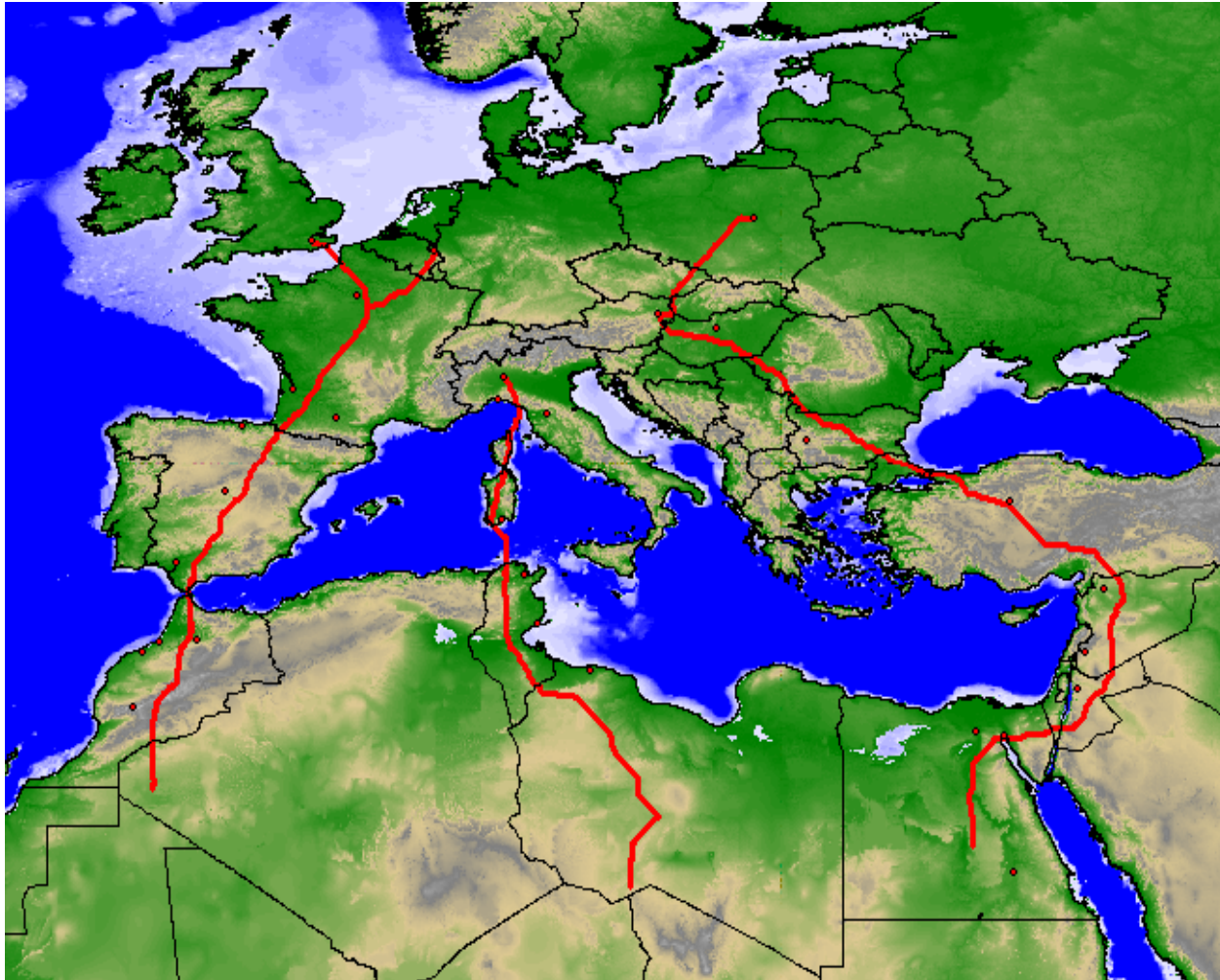
Turmtechnologie mit Flusssalz — kommerzielle Kraftwerke



	Gemasolar	Crescent Dunes	Cerro Dominador	Supcon Solar
Status	In Operation	In Construction	In Construction	In Construction
Site	Sevilla, Spain	Tonopah, Nevada	Calama, Chile	Delingha, China
Design	SENER/CIEMAT	SolarReserve	Abengoa	Supcon Solar
HTF	Solar Salt	Solar Salt	Molten Salt	Molten Salt
Receiver type	External	External	External	External
Thermal power	120 MW _{th}	560 MW _{th}	not public	not public
Storage capacity	15 h	15 h	18 h	2.5 h
Electrical power	20 MW _{el}	110 MW _{el}	110 MW _{el}	50 MW _{el}



Stromimport mittels HGÜ

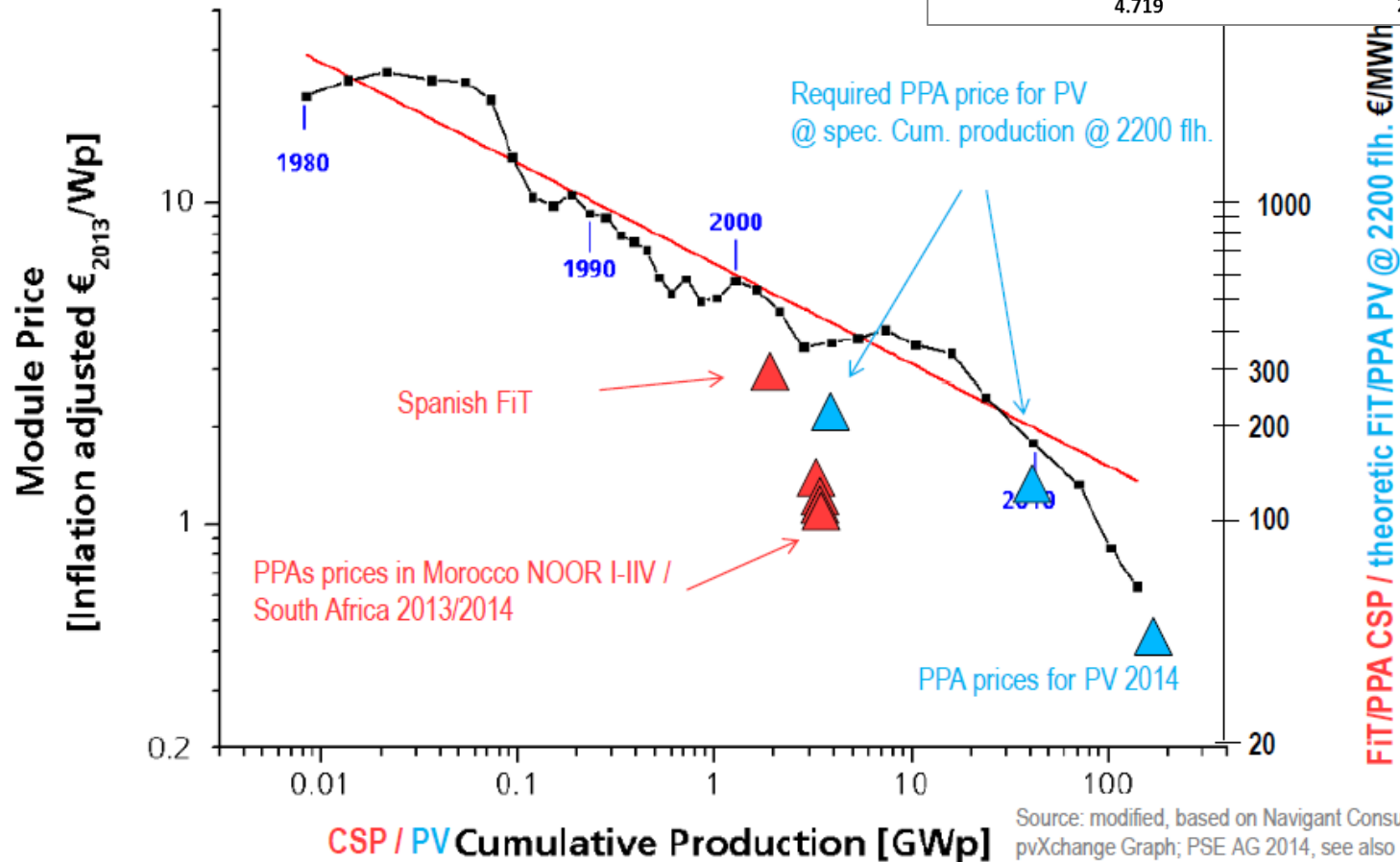
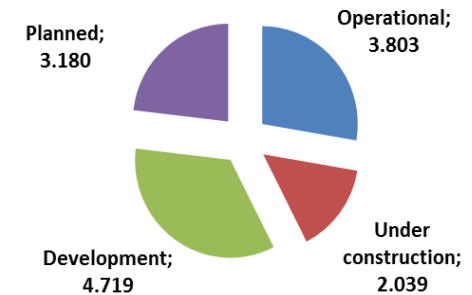


Wie passen diese Technologien in einen zukünftigen Energiemix aus Wind, PV, Biomasse, Geothermie und CSP?



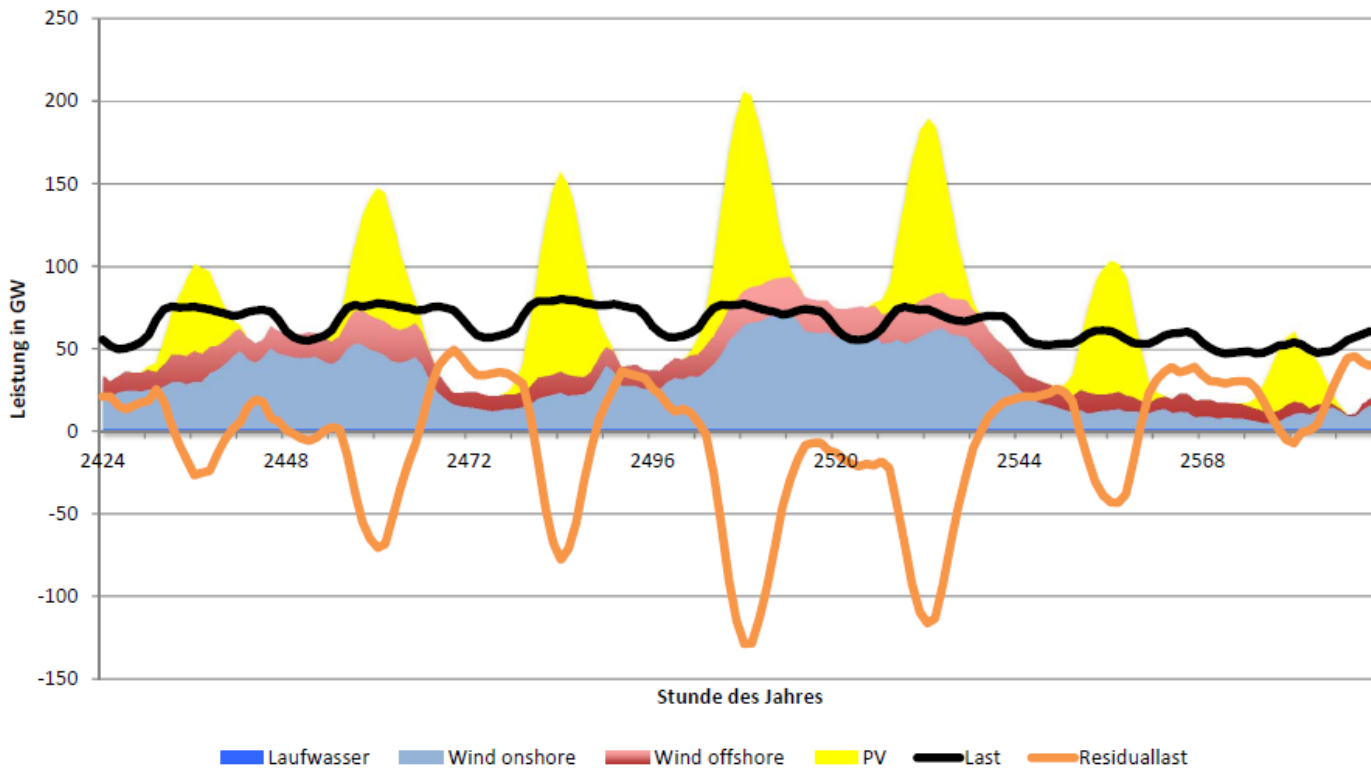
Marktgröße und Kostenreduktion

CSP Capacity in MW (6/2014) Total 13.714 MW

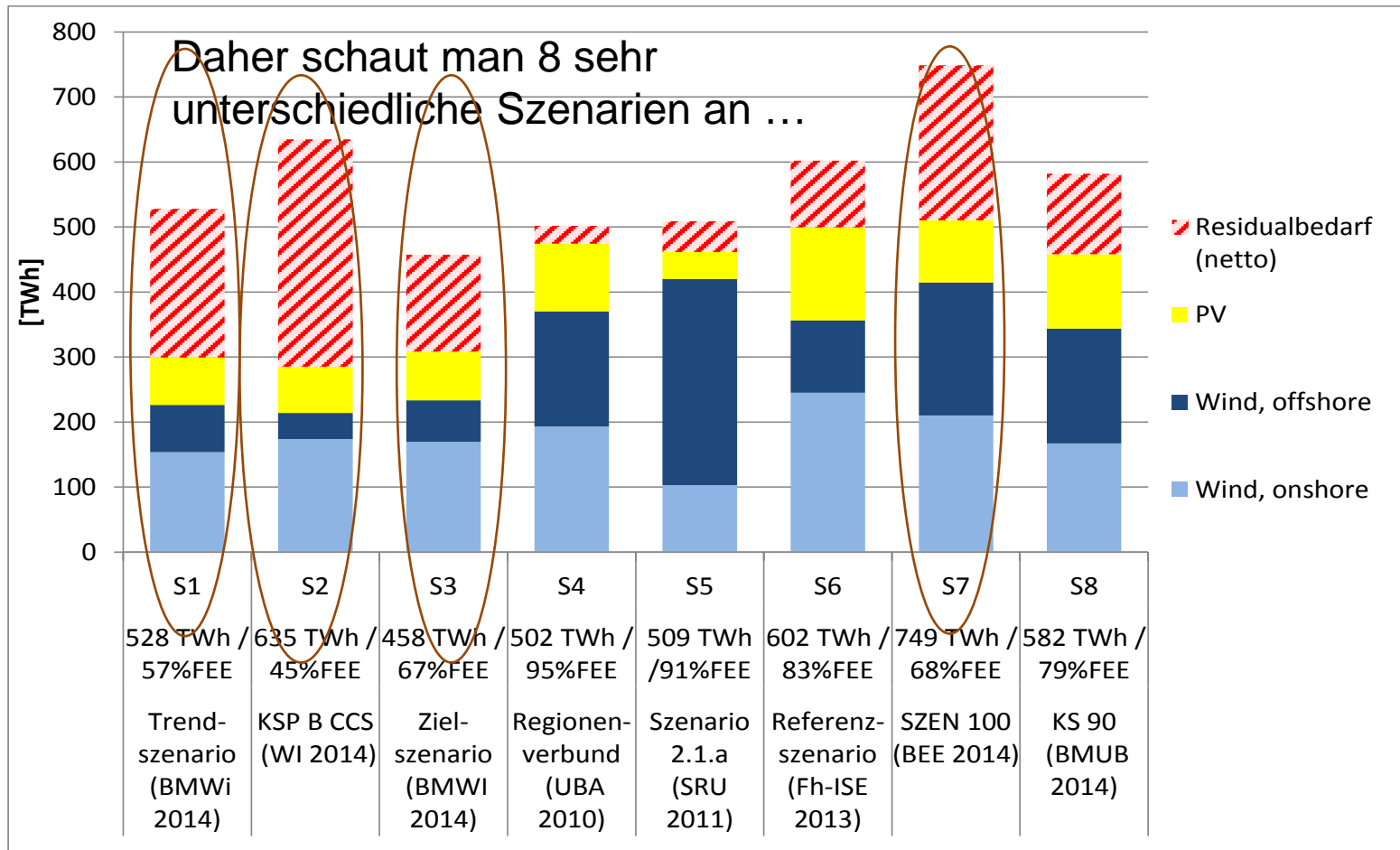


Source: modified, based on Navigant Consulting, EuPD, IHS, pvXchange Graph; PSE AG 2014, see also ISE 2014 S(3)/p.40

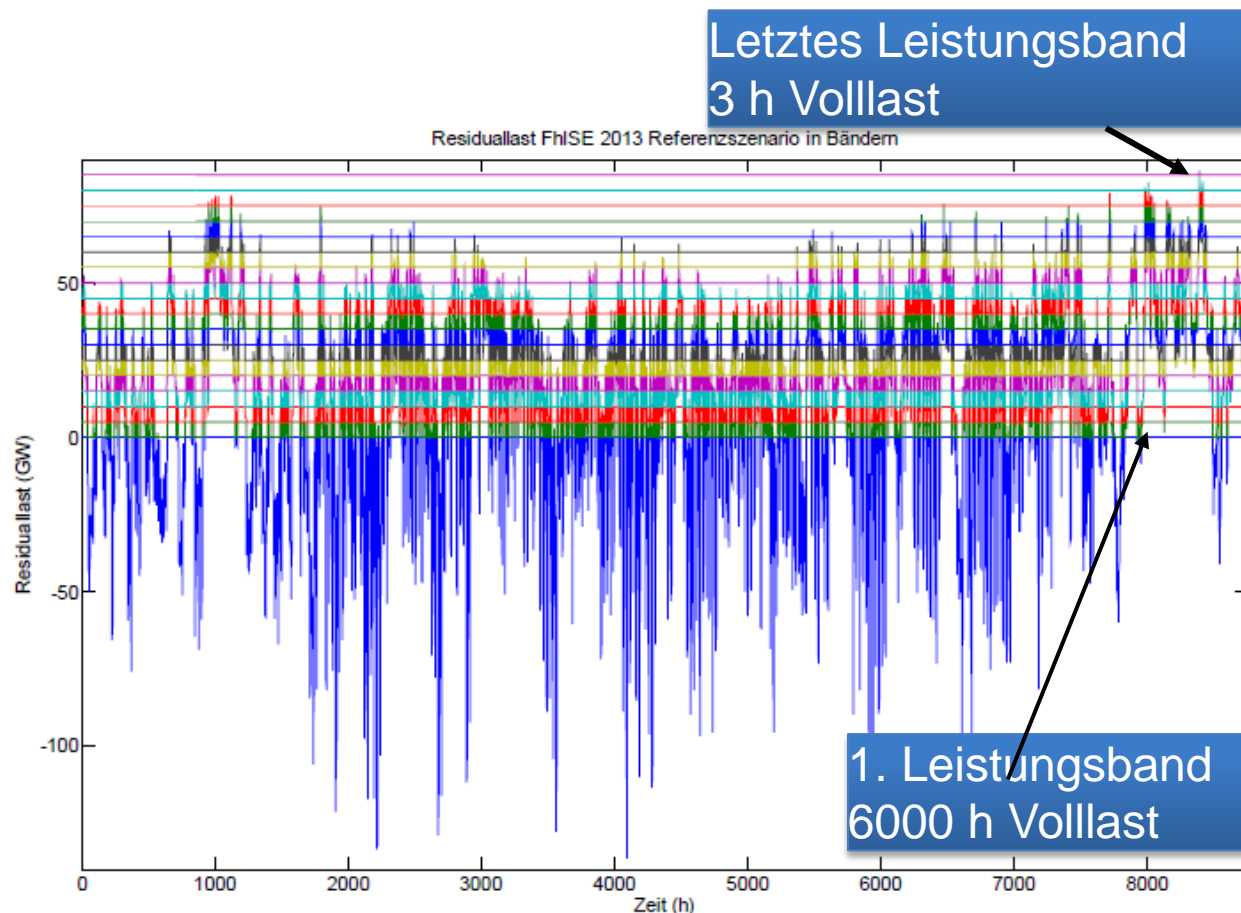
Welchen Technologien decken Residuallast bei hohen Anteilen von fluktuierendem Wind und PV Strom am günstigsten?



Die Residuallast in 2050 hängt vom Strombedarf und vom Wind und PV Ausbau ab



Methodik: Aufteilung der R-Last in Leistungsbänder



- Bänder haben unterschiedlich Zahl von Volllaststunden
- Zur Deckung der Bänder wird die Technologie mit den geringsten Stromgestehungskosten gewählt
- Systeme die in einem Leistungsband liefern können nicht gleichzeitig in einem darüber liegenden Leistungsband anbieten, da die Lieferung zeitlich gleichzeitig erfolgt



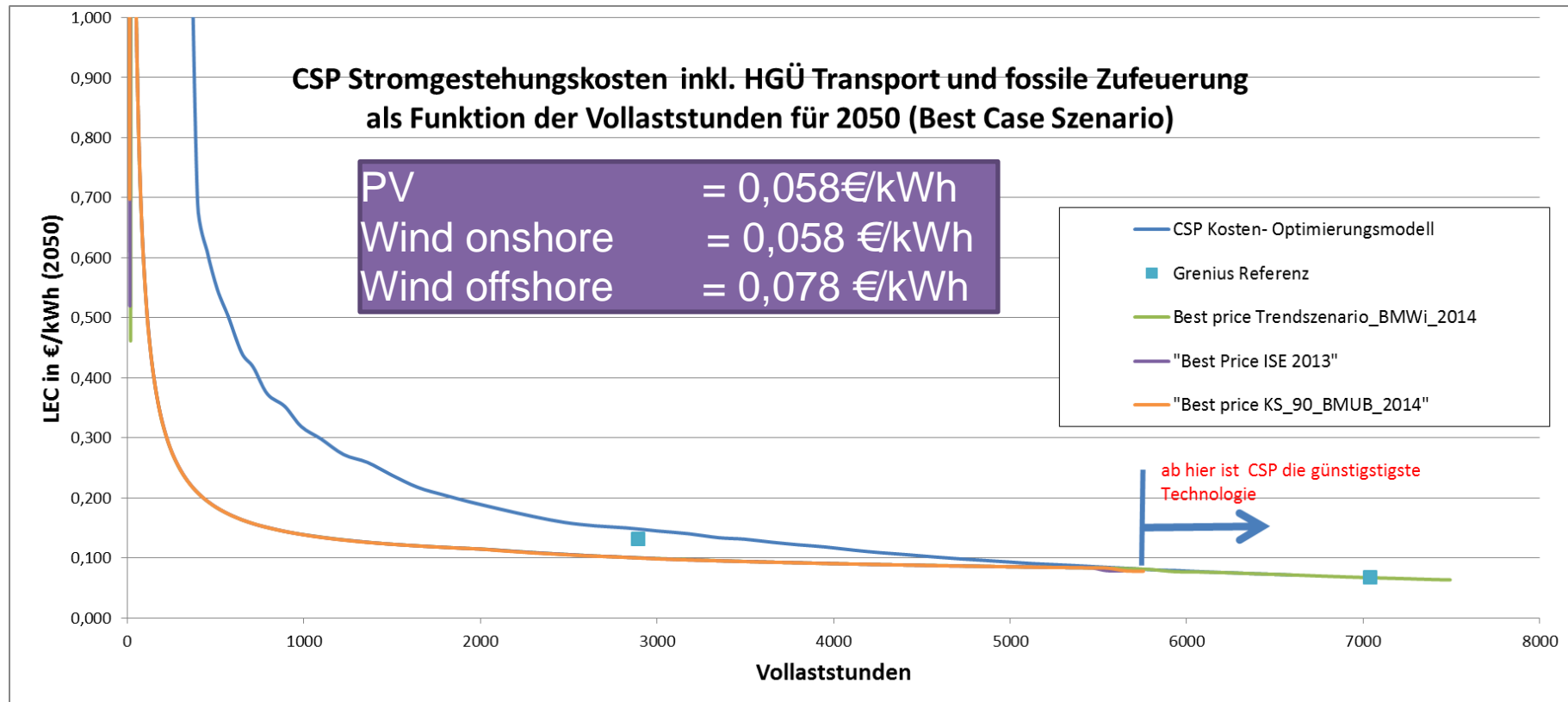
Die günstigste Technologie wird für jedes Band ausgewählt...

Vollaststunden	5639	5549	5469	5393	5313	5230	5138	5057	4974	4893	4793	4699	4608	4505	4412
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14	Band 15
DT Steinkohle 600 MW	0,089	0,089	0,090	0,090	0,091	0,091	0,092	0,092	0,093	0,093	0,094	0,095	0,095	0,096	0,097
Gasturbine	0,099	0,099	0,099	0,099	0,099	0,099	0,099	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,101	0,101	0,101
Gasturbine - Biogas	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,127	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,129	0,129	0,129
GuD	0,083	0,083	0,083	0,084	0,084	0,084	0,085	0,085	0,085	0,086	0,086	0,087	0,087	0,087	0,088
GuD - Biogas	0,103	0,103	0,104	0,104	0,104	0,105	0,105	0,105	0,106	0,106	0,107	0,107	0,107	0,108	0,108
Motorenkraftwerk	0,106	0,107	0,107	0,107	0,107	0,108	0,108	0,108	0,109	0,109	0,109	0,110	0,110	0,110	0,111
Motorenkraftwerk - Biogas	0,135	0,135	0,136	0,136	0,136	0,136	0,137	0,137	0,137	0,138	0,138	0,138	0,139	0,139	0,139
Industrielle KWK 1MW	0,078	0,079	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000
Holz-KW 5MW	0,135	0,136	0,138	0,139	0,140	0,142	0,144	0,145	0,147	0,149	0,151	0,153	0,155	0,158	0,160
CSP	0,082	0,083	0,085	0,085	0,087	0,087	0,089	0,090	0,094	0,092	0,098	0,099	0,100	0,104	0,105
Geothermie	0,200	0,203	0,206	0,209	0,212	0,215	0,219	0,223	0,226	0,230	0,235	0,240	0,244	0,250	0,255
Pumpspeicher	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000
CAES	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000
Wasserstoffspeicher	0,114	0,114	0,115	0,116	0,116	0,116	0,116	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,117	0,116
Methanspeicher Gasturbine	0,356	0,360	0,362	0,365	0,360	0,362	0,358	0,362	0,361	0,357	0,354	0,349	0,351	0,352	0,349
Methanspeicher GuD	2,001	2,011	2,020	2,027	2,016	2,024	2,019	2,049	2,060	2,034	2,037	2,016	2,014	2,019	1,993
Generische Batterie	1,719	1,733	1,751	1,764	1,774	1,797	1,824	1,837	1,852	1,868	1,880	1,900	1,912	1,928	1,923
Kombinierte DSM für Haushalte	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000
GHD DSM	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000
DSM Industrie	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	#####	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000	999,000
Günstigster Preis	0,078	0,079	0,083	0,084	0,084	0,084	0,085	0,085	0,085	0,086	0,086	0,087	0,087	0,087	0,088
Zweitgünstigster Preis	0,082	0,083	0,085	0,085	0,087	0,087	0,089	0,090	0,093	0,092	0,094	0,095	0,095	0,096	0,097
Drittgünstigster Preis	0,083	0,083	0,090	0,090	0,091	0,091	0,092	0,092	0,094	0,093	0,098	0,099	0,100	0,101	0,101

Obwohl die Kosten zur Deckung der Residuallast höher liegen als die Gestehungs-kosten für Wind und PV Strom ist es gesamtwirtschaftlich günstiger diese Technik einzusetzten, da sie zur richtigen Zeit produziert



Die Rolle von CSP für Deutschland : Stromimport bei mehr als 6000 Vollaststunden kann günstigste Option sein



Zusammenfassung

- CSP Technologien ist geeignete und kostengünstige Technologie um die Residuallast auch in Deutschland durch Stromimport zu decken
- Der Wert für die Deckung der Residuallast liegt über den Kosten für die Bereitstellung von intermittierend Wind und PV Leistung.
- Die Differenz hängt von den genauen Lastrandbedingungen ab
- CSP steht mit anderen Technologien zur Deckung der Residuallast in Konkurrenz, insbesondere Biomasse GuD, Braunkohle mit CSS und ggf. der Geothermie.
- CSP konkurriert aber nicht direkt mit Wind und PV

